

Міністерство освіти і науки України
Національна металургійна академія України
Державний вищий навчальний заклад
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОНДРАТЕНКО ПАВЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.882.1:[669.141.24+669.15-194.2]

ДИСЕРТАЦІЯ

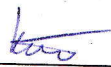
**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА І МЕТОДИКИ
ВИПРОБУВАНЬ ВИСОКОМІЦНИХ КРІПИЛЬНИХ ВИРОБІВ З
ВУГЛЕЦЕВИХ ТА НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ**

05.02.01 – Матеріалознавство

13 -Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ Кондратенко П. В.

(підпис)

Науковий керівник: Гуль Юрій Петрович кандидат технічних наук, доцент

Дніпро – 2020

АНОТАЦІЯ

Кондратенко П.В. **Удосконалення технології виробництва і методики випробувань високоміцних кріпильних виробів з вуглецевих та низьколегованих сталей.** - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 «Матеріалознавство» (13 - Механічна інженерія). – Національна металургійна академія України; Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури" Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розробці технологічних параметрів комбінованого впливу активної та циклічної деформації, що використовується для підвищення рівня службових характеристик холоднодеформованих металовиробів масового призначення з низьковуглецевих нелегованих сталей та вдосконалення методик здавальних випробувань кріпильних виробів.

Підвищення надійності і довговічності елементів конструкцій є однією з найважливіших задач сучасної металургії та машинобудівної галузі. Актуальним та конче важливим є рішення цієї проблеми для всіх видів кріпильних виробів, які використовуються у вузлах металургійних агрегатів, тягового та рухомого складу залізниць, їх шляхового господарства, станків та верстат машинобудівних підприємств, що працюють в умовах постійного та безперервного накопичення внутрішніх дефектів і пошкоджень, через які, в кінцевому рахунку, відбувається передчасне руйнування окремих елементів та устаткування в цілому. Саме це обумовлює, у якості надзвичайно важливого завдання створення нових технологічних процесів зміцнюючої обробки холоднодеформованих виробів масового призначення з метою поліпшення їх показників надійності, довговічності та експлуатаційної безпечності.

Дослідження показали, що певні поєднання активної та циклічної деформації дозволяють підвищувати рівень службових характеристик холоднодеформованих металовиробів, зокрема втомну міцність кріпильних

виробів. Однак, ті ж дослідження і аналіз їх результатів привели до висновку, що прорив в забезпеченні отримання холоднодеформованих металовиробів з широким спектром підвищених службових властивостей можливий тільки при системному дослідженні умов синергетики активної і циклічної деформації з використанням різних схем навантаження і параметрів, з подальшим визначенням вимог до нового технологічного обладнання та його логістики.

Результат такого деформаційного впливу принципово відрізняється від термічного вливу, тому що не призводить до суттєвого зменшення щільності дислокацій, а до їх перерозподілу з отриманням нового типу структури і, відповідно, властивостей. Це дозволяє, не знижуючи рівня зміцнення, поліпшувати рівні службових характеристик: опору деформації і руйнування малої схильності до деформаційного старіння, релаксаційної стійкості, опору втомному руйнуванню. При цьому ефективно використання циклічної деформації передбачає оптимізацію схеми і ступеня активної деформації. Створена циклічною деформацією нерівноважна концентрація вакансій забезпечує неконсервативне ковзання насамперед крайових дислокацій, що обумовлює перш за все задане перетворення дислокаційної субструктури. Тому схема активної деформації повинні забезпечити підвищену щільність саме таких дислокацій.

Використовуваний спосіб забезпечує досягнення поставленої мети на основі: неконсервативності складання дислокацій по Ж. Фріделю; оптимізації схеми активної деформації: комбінації схем циклічної деформації з різною амплітудою і частотою циклів; узгодження ступеня активної деформації зі схемами і параметрами циклічної деформації.

В основу нової технології, що забезпечує необхідний рівень властивостей закладені фундаментальні закономірності одержання лінійних і точкових дефектів при активній і циклічній деформації і закономірності взаємодії між зазначеними дефектами, в тому числі під час руху дислокацій, а також на закономірності зв'язку між властивостями і структурним станом

металу.

Запропоновані технологічні параметри у порівнянні зі стандартними технологічними параметрами отримання холоднодеформованих металовиробів масового призначення при одному рівні одержуваних службових характеристик дозволить отримати економію до 3% на заготовці в результаті заміни легованої сталі на звичайну вуглецеву. При цьому, запропоновані технологічні параметри, процесу отримання холоднодеформованих виробів в порівнянні з існуючими в даний час технологіями підвищують значення службових характеристик на 20-40%, що додатково збільшує ефективність запропонованих технологічних рішень при одночасному зниженні їх собівартості зазначеній вище

Аналіз сучасних стандартів на механічні властивості та методи випробувань болтів, гвинтів та шпирлик показав їх не відповідність сучасному рівню розвитку випробувальної техніки через присутність таких методів випробувань, як удар молотком по головці болта, випробування розтягненням до пробного навантаження, визначення низки характеристик на оброблених (обточених) зразках.

Визначення механічних властивостей кріпильних виробів (болтів, гвинтів та шпирлик) методом випробування оброблених (обточених) зразків викривлює істинні значення характеристик і може призводити до невірної призначення класу міцності готової продукції.

Після проведення випробувань контрольних зразків (болтів) на розтяг до документу про якість мають вноситися значення характеристики тимчасового опору руйнуванню, який визначається на готових болтах.

Випробування готових болтів на розтяг із записом діаграми дає можливість візуально оцінювати виконання вимог щодо випробувань пробним навантаженням.

Наявність вказаних недоліків робить очевидною необхідність вдосконалення нормативної документації на проведення контролю властивостей кріпильних виробів.

Холоднодеформовані болти, як правило, не містять легуючих елементів,

які ефективно зменшують інтенсивність деформаційного старіння, тому процесі природного і штучного деформаційного старіння можуть знижувати опір в'язкому і крихкому руйнуванню.

Однак, в існуючих нормативних документах не прописаний механізм контролю механічних властивостей з урахуванням старіння, тому болти після виготовлення і доставки споживачеві, при підготовці до застосування і в процесі експлуатації можуть мати різні характеристики міцності та пластичності. Дана обставина змушує враховувати схильність сталевих виробів до деформаційного старіння і можливі його наслідки. Тому в роботі було запропоновано експериментально підтвердити використання низькотемпературного термічного впливу 400-450 °C після виготовлення кріпильних виробів холодною деформацією для зменшення деформаційного старіння холоднодеформованих кріпильних виробів.

Додатковий низькотемпературний термічний вплив на холоднодеформовані болти (нагрів в дорекристалізаційному інтервалі температур) дозволив підвищити межі міцності і плинності, а також характеристики пластичності болтів, зберегти характеристики опору деформації і пластичності приблизно на одному рівні протягом усього часу деформаційного старіння.

Особливо важливо, що цей спосіб не просто забезпечує збереження властивостей холоднодеформованих сталевих виробів, а й збереження підвищеного комплексу механічних властивостей в порівнянні з комплексом властивостей після технологічної формуючої деформації, в тому числі підвищену пластичність і опір в'язкому руйнуванню.

При розробці технології високоміцних кріпильних виробів з низьковуглецевих сталей були сформульовані основні вимоги до параметрів активної та циклічної деформації, а також термічного впливу. Встановлені основні параметри технологічного режиму виробництва високоміцних кріпильних виробів без фінішного термічного зміцнення. На підставі визначення характеристик опору руйнуванню, втомної міцності доведено, що вироби,

виготовлені шляхом холодної деформації, по службовим характеристикам не поступаються продукції, яка виробляється по традиційній технології з використанням енергомістких операцій загартування та відпуску.

Встановлено, що комплекс механічних властивостей, які визначаються на готових болтах і обточених зразках, істотно різний, причому ступінь відмінності залежить від рівня зміцнення. В цілому можна вважати, що незалежно, в досліджених межах, від відмінностей хімічного складу сталей і способу зміцнення, вплив рівня зміцнення на величину відмінностей між властивостями, обумовленими на готових болтах і обточених зразках, описується єдиними залежностями. Водночас характер цих залежностей різний для властивостей опору пластичної деформації (межа міцності та плинності) і властивостей пластичності (подовження), а також опору в'язкого руйнування (рівномірного подовження і швидкості падіння номінальної напруги в інтервалі локалізованої деформації та руйнування).

Вперше показано і пояснено неоднозначний вплив системи надрізів в порівнянні з одиничним надрізом на ефект зміцнення в надрізі при різних рівнях структурного зміцнення - в разі одиничного надрізу геометричне зміцнення в загальному ефекті, що фіксується, зміцнення в надрізі виступає як співмножник зі структурним зміцненням, а в випадку системи надрізів при певному рівні структурного зміцнення вплив надрізів виявляється фактором втрати міцності. Екстремальний вплив рівня структурного зміцнення на рівень опору пластичної деформації слід пов'язувати з результатом інтерференції полів напружень, що виникають як у надрізів в навантаженому об'єкті, так і полів напружень, обумовлених рівнем структурного зміцнення. Вперше також формалізовано вплив різних чинників на ефект зміцнення в надрізі у вигляді рівняння, яке не суперечить експериментальним даним.

Результати дисертаційної роботи пройшли промислову апробацію в умовах метизного виробництва в кріпильному цеху підприємства ПАТ «Дніпрометиз», що підтверджено актом апробації ПАТ «Дніпрометиз».

Ключові слова: високоміцні кріпильні вироби, активна та циклічна

деформація, деформаційне старіння, низьковуглецева сталь, механічні випробування, характеристики в'язкого руйнування.

SUMMARY

Kondratenko P. Improvement of production technology and testing methods of high strength fasteners made of carbon and low-alloy steels. - Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate of Science Degree in Specialty 05.02.01“Materials science” (13 – Mechanical engineering). - National Metallurgical Academy of Ukraine; State Higher Educational Establishment “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture” Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2020.

The dissertation is devoted to the development of technological parameters of the combined influence of active and cyclic deformation, which is used to increase the performance of cold - formed mass metal products from low - carbon non - alloy steels and improve the methods of passing tests of fasteners.

Improving the reliability and durability of structural elements is one of the most important tasks of modern metallurgy and engineering. Relevant and extremely important is the solution of this problem for all types of fasteners used in the units of metallurgical units, traction and rolling stock of railways, their track facilities, machines and machines of machine-building enterprises operating in conditions of constant and continuous accumulation of internal defects and damage, through which, ultimately, there is a premature destruction of individual elements and equipment as a whole. This makes it extremely important to create new technological processes for strengthening the processing of cold-formed mass-produced products in order to improve their reliability, durability and operational safety.

Studies have shown that certain combinations of active and cyclic deformation can increase the level of performance of cold-formed metal products, in particular the fatigue strength of fasteners. However, the same studies and analysis of their results led to the conclusion that a breakthrough in ensuring the production of cold-formed

metal products with a wide range of enhanced performance properties is possible only with a systematic study of synergetics of active and cyclic deformation using load schemes and parameters, new technological equipment and its logistic.

The result of such a deformation effect is fundamentally different from thermal effect, because it does not lead to a significant reduction in the density of dislocations, but to their redistribution to obtain a new type of structure and accordingly, properties. This allows, without reducing the level of hardening, to improve the levels of performance: resistance to deformation and fracture, low susceptibility to deformation aging, relaxation resistance, resistance to fatigue failure, fire resistance, corrosion resistance. The effective use of cyclic deformation involves optimizing the scheme and the degree of active deformation. The non-equilibrium concentration of vacancies created by cyclic deformation provides non-conservative sliding of edge dislocations first of all that causes first of all the set transformation of dislocation substructure. Therefore, the scheme of active deformation should provide an increased density of such dislocations.

The method used ensures the achievement of this goal on the basis of non-conservative composition of dislocations according to J. Friedel; optimization of the active deformation scheme; combinations of cyclic deformation schemes with different amplitude and frequency of cycles, coordination of the degree of active deformation with the schemes and parameters of cyclic deformation

The new technology, which provides the required level of properties, is based on the fundamental laws of obtaining linear and point defects during active and cyclic deformation and the laws of interaction between these defects, including during the movement of dislocations, as well as the laws of connection between properties and structural state, metal.

The offered technological parameters in comparison with standard technological parameters of production of cold-deformed metal products at mass level at one level of the received service characteristics will allow to receive economy to 3% on preparation as a result of replacement of alloyed steel on usual carbon. In this case, the proposed technological parameters of the process of obtaining cold-deformed

products in comparison with existing technologies increase the value of performance by 20-40% which further increases the efficiency of the proposed technological solutions while reducing their cost above.

Analysis of modern standards for mechanical properties and test methods of bolts, screws and studs showed their inconsistency with the current level development of test equipment due to the presence of such test methods as hammer on the bolt head, tensile testing to test load, determination of a number of character samples.

Determining the mechanical properties of fasteners (bolts, screws and studs) tested on processed (turned) samples distorts the true values of the characteristics and can lead to incorrect assignment of the strength class of the finished product.

After testing the test specimens (bolts) for tension, the values of the characteristics of the temporary resistance to failure, which is determined on the finished bolts, must be entered in the quality document.

Testing of ready-made tensile bolts with a diagram entry makes it possible to visually assess compliance with the test load requirements.

The presence of these shortcomings makes it necessary to improve the regulatory documentation for the control of the properties of fasteners.

Cold-formed bolts usually do not contain alloying elements that effectively reduce the intensity of strain aging, so the processes of natural and artificial strain aging can reduce the resistance to viscous and brittle fracture.

However, the existing regulations do not prescribe a mechanism for controlling mechanical properties taking into account aging, so the bolts after manufacture and delivery to the consumer, in preparation for use and during operation may have different characteristics of strength and ductility. This fact makes us take into account the susceptibility of steel products to deformation aging and its possible consequences. Therefore, the paper proposed and experimentally confirmed the use of low-temperature thermal exposure of 400-450 °C after the manufacture of fasteners by cold deformation to reduce the deformation aging of cold-deformed fasteners.

Additional low-temperature thermal effect on cold-deformed bolts (heating in the pre-recrystallization temperature range) allowed to increase the strength and yield

strength, as well as the plasticity characteristics of the bolts, keep the characteristics of resistance to deformation and ductility at about the same level throughout the aging period.

It is especially important that this method not only preserves the properties of cold-formed steel products* but also preserves the increased set of mechanical properties compared to the set of properties after technological forming deformation, including increased ductility and resistance to viscous fracture.

During the development of the technology of high-strength fasteners made of low-carbon steels, the basic requirements for the parameters of active and cyclic deformation, as well as thermal effects were formulated. The main parameters of the technological mode of production of high-strength fasteners without finishing thermal hardening are established. Based on the determination of the characteristics of resistance to fracture, fatigue strength, it is proved that the products made by cold deformation, the performance characteristics are not inferior to products produced by traditional technology using energy-intensive operations of hardening and tempering.

It is established that the complex of mechanical properties, which are determined on the finished bolts and turned samples, is significantly different, and the degree of difference depends on the level of hardening. In general, we can assume that regardless of the studied limits, depending on the differences in the chemical composition of steels and the method of hardening, the influence of the level of hardening on the differences between the properties due to the finished bolts and turned samples is described by unique dependences. At the same time, the nature of these dependences is different for the properties of resistance to plastic deformation (yield strength) and properties of plasticity (elongation), as well as resistance to viscous fracture (uniform elongation and rate of nominal stress in the range of localized deformation and fracture).

For the first time the ambiguous influence of the notch system in comparison with a single notch on the effect of notch hardening at different levels of structural reinforcement is shown and explained - in case of a single notch geometric reinforcement system of cuts at a certain level of structural strengthening the influence

of cuts is a factor in the loss of strength. The extreme effect of the level of structural hardening on the level of resistance to plastic deformation should be associated with the result of interference of stress fields arising from both cuts in the load object and stress fields due to the level of structural hardening. For the first time, the influence of various factors on the effect of hardening in the notch in the form of an equation that does not contradict the experimental data is also formalized.

The results of the dissertation were industrially tested in terms of hardware production in the fastening shop of the enterprise PJSC "Dniprometiz", which is confirmed by the act of approbation of PJSC "Dniprometiz".

Keywords: high strength three-blade products, active and cyclic deformation, deformation aging, low carbon steel, mechanical testing, viscous fracture characteristics.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертації

1. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Перчун Г. И. Сравнительный анализ комплекса механических свойств, полученных при испытаниях готовых болтов и обточенных образцов. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна*. 2015. №4(58). С. 132-141.

2. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Чмелева В. С., Перчун Г. И. Характеристики макролокализации пластической деформации при одноосном растяжении стальных объектов и их сопротивление вязкому разрушению. *Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. ПГАСА*. 2016. № 89. С. 70-77.

3. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Чмелева В. С., Перчун Г. И. Эффект “упрочнения в надрезе” при единичном надрезе и системе надрезов в зависимости от исходного уровня прочности. *Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. ПГАСА*. 2016. № 90.

С. 83-90.

4. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Моргун М. П. Методики определения и способы снижения склонности стальных изделий к деформационному старению. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 4. С. 63-67.

5. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Чмелева В. С., Перчун Г. И. Удосконалення методів визначення механічних властивостей стрижневих різьбових кріпильних виробів на розтяг. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 6. С. 93-99.

6. Ивченко О. В., Кондратенко П. В., Перчун Г. И., Гуль Ю. П., Чмельова В. С. До питання про нормування міцностних властивостей стрижневих кріпильних виробів залежно від їх застосування і технології виготовлення. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2018. №5(112). С. 91-99.

7. Ивченко О. В., Гуль Ю. П., Перчун Г. И., Чмельова В. С., Кондратенко П. В. Аналіз передбачених стандартами характеристик опору руйнуванню кріпильних виробів на прикладі болтів класу міцності 5.8 і перспективні напрямки їх вдосконалення (в порядку обговорення проблеми). *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2019. №1 (113). С. 12-20.

8. Gul Y. P., Perchun, G. I., Kondratenko, P. V., Chmeleva, V. S., Ivchenko, A. V. Heat Treatment to Slow Strain Aging in Threaded Steel Bolts. *Steel in Translation*. 2019. T. 49. №. 2. С. 137-140. (Scopus)

9. Gul Yu., Ivchenko A., Perchun G., Chmeleva V., Kondratenko P. Basic principles of the new technology project of manufacturing steel products hardened by the cold deformation. *Scientific development and achievements: monograph*. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, N1 7GU. 2018. volume 5. P. 225-244.

10. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Чмелева В. С. Сопротивление вязкому разрушению и равномерная деформация нагружаемого металлического объекта. *Коллективная монография №56 «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering*. Poland Częstochowa. 2016. №56. С. 407-410.

11. Гуль Ю. П., Кондратенко П. В., Перчун Г. И., Чмелева В. С., Ивченко А. В. Новая ресурсосберегающая технология производства высокопрочного стального крепежа. *XIX International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics»*, Czestochowa. 2018. № 78. С. 96-99.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

12. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В. Влияние функциональных надрезов (резьбы) на характеристики сопротивления пластической деформации болтов при различном уровне упрочнения. *75-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. 2015. С. 357-358.

13. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Якушев А. С., Коваленко В. Ф., Бурчак С. С. Влияние нагрева в процессе нанесения защитных покрытий на механические свойства крепежных изделий. *Материалы IV Всеукраинской межвузовской научно-технической конференции*, 2016. С. 77-78.

14. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Чмелева В. С. System analysis of manufacturing technologies of high-strength steel bolts. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2017: тези доповідей Дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції*, 2017. С. 12.

15. Гуль Ю. П., Перчун Г. И., Ивченко О. В., Чмелева В. С., Кондратенко П. В. Новая технология производства стальных стержневых крепильных виробів. *II Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід»*. 2018. С. 266-268.

16. Ивченко А. В., Гуль Ю. П., Перчун Г. И., Чмелева В. С., Кондратенко П. В. Анализ характеристик сопротивления разрушению крепежных изделий и предложения по их совершенствованию (в порядке обсуждения). *7th International youth conference "Perspectives of science and education"*. 2019. С. 270-281.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати

дисертації

17. Патент UA №103677. Різьбовий кріпильний елемент. Гуль Ю. П., Івченко О. В., Кондратенко П. В., Чмельова В. С., Перчун Г. І., u201506182 від 23.06.2015 опубл. 25.12.2015, бюл. № 24.

18. Патент UA №114904. Спосіб визначення механічних властивостей стрижневих різьбових кріпильних виробів. Гуль Ю. П., Івченко О. В., Кондратенко П. В., Чмельова В. С., Перчун Г. І., опубл. 27.03.2017 р., бюл. № 6.

19. Патент UA №107565. Спосіб визначення пластичних властивостей стрижневих різьбових кріпильних виробів. Івченко О. В., Гуль Ю. П., Семенов О. А., Чмельова В. С., Перчун Г. І., Кондратенко П. В., u201513117 від 30.12.2015, опубл. 14.06.2016, бюл. № 11.

20. Патент UA №130469. Спосіб виготовлення стрижневих кріпильних різьбових виробів. Гуль Ю.П., Кондратенко П. В., Перчун Г. І., Чмельова В. С., Івченко О. В. u201806205 від 04.06.2018, опубл. 10.12.2018, бюл. № 23.

21. Патент UA № 135230. Спосіб експрес випробування пробним навантаженням сталевого стрижневого нарізного кріпильного виробу. Івченко О. В., Рабер Л. М., Білодіденко С. В., Кондратенко П. В., Перчун Г. І. Заявлено 03.01.2019 р. Публікація 25.06.2019 р., бюл. №12.

22. Патент UA №137693 Спосіб експрес контролю сталевих стрижневих різьбових кріпильних виробів на схильність до крихкого руйнування. Івченко О. В., Рабер Л. М., Білодіденко С. В., Перчун Г. І., Гуль Ю. П., Чмельова В. С., Кондратенко П. В. u201901135 від 04.02.2019, опубл. 11.11.2019, бюл. № 21.

ЗМІСТ

	Стр.
АНОТАЦІЯ	2
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. Основні тенденції виробництва високоміцних кріпильних виробів	23
1.1 Високоміцні кріпильні вироби та їх призначення	23
1.2 Аналіз існуючих технологій виробництва кріпильної продукції підвищеної міцності	26
1.3 Аналіз недоліків здавальних випробувань високоміцних кріпильних виробів, що нормуються нормативною документацією	31
1.4 Висновки по розділу 1	42
1.5 Список використаних джерел в розділі 1	43
РОЗДІЛ 2. Розробка нової технології виробництва сталевих високоміцних кріпильних виробів	44
2.1 Обґрунтування вибору матеріалу дослідження	44
2.2 Методика проведення дослідження нової технології виробництва високоміцних кріпильних виробів	46
2.3 Методика механічних випробувань	48
2.4 Методика металографічних досліджень	49
2.5 Методика рентгеноструктурного дослідження	50
2.6 Методика дослідження тонкої структури	52
2.7 Висновки по розділу 2	53
2.8 Список використаних джерел в розділі 2	53
РОЗДІЛ 3. Розробка нової технології виробництва сталевих високоміцних кріпильних виробів	54
3.1 Вплив ступеня деформування при волочінні на структуру, твердість, міцність і пластичні характеристики	55
3.2 Визначення оптимальних параметрів циклічної	

деформації і термічної дії на заготовку для холодного об'ємного штампування	59
3.3 Дослідження мікроструктури зразків холоднодеформованої заготовки кріплення після активної холодної деформації та додаткових обробок	69
3.4 Рентгеноструктурне дослідження впливу активної холодної деформації, циклічної деформації та термічних	71
3.5 Дослідження втомної міцності болтів виготовлених за стандартною та дослідною технологіями	79
3.6 Технологія стабілізуючої обробки холоднодеформованих кріпильних виробів	85
3.7 Висновки по розділу 3	92
3.8 Список використаних джерел в розділі 3	93
РОЗДІЛ 4. Удосконалення методики здавальних випробувань сталевих кріпильних виробів	94
4.1 Шляхи вдосконалення методик контролю заготовки і готових кріпильних виробів	99
4.2 Порівняльний аналіз комплексу механічних властивостей, отриманих при випробуваннях готових болтів і обточених зразків	99
4.3 Дослідження мікроструктури випробуваних болтів	108
4.4 Нові методики визначення пластичних властивостей болтів	112
4.5 Характеристики макролокалізації пластичної деформації при одноосьовому розтягуванні сталевих об'єктів	120
4.6 Підвищення тріщиностійкості високоміцних кріпильних виробів	125
4.7 Промислова апробація виробництва високоміцного кріплення за технологією багаторазових механо-термічних впливів	132

	17
4.8 Висновки по розділу 4	135
4.9 Список використаних джерел в розділі 4	137
ВИСНОВКИ	138
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	141
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА І ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ	151
ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ	155

ВСТУП

Актуальність теми. Кріпильні вироби (болти, гайки, гвинти, шурупи, заклепки, шайби, цвяхи і т.п.) є найбільш масовими деталями, застосовуваними в різних галузях промисловості. Зниження собівартості та підвищення якості кріпильних виробів є актуальною проблемою вітчизняної метизної промисловості, вирішення якої умовах перевиробництва металопродукції забезпечує конкурентоспроможність виробів і розвиток метизних заводів. При цьому виробництво повинно бути націлене на виготовлення кріплення прогресивної конструкції, тобто виробів, що володіють високою надійністю, а також розширеними функціональними і експлуатаційними властивостями. Застосування таких виробів має забезпечувати зниження енергетичних, матеріальних та трудових ресурсів при виготовленні кріплення, монтажу та експлуатації машин, конструкцій, споруд і т.п.

Найбільш ефективним способом виготовлення стрижневих кріпильних виробів прогресивної конструкції є холодне об'ємне штампування на багатопозиційних пресах-автоматах, яка в порівнянні з обробкою різанням і гарячим штампуванням забезпечує істотне підвищення якості та продуктивності. Тому теоретичні і експериментальні дослідження, спрямовані на розробку, вдосконалення і впровадження технологічних процесів холодного штампування кріпильних виробів прогресивної конструкції на високопродуктивних пресах-автоматах, є важливими і актуальними. При розробці високопродуктивних технологічних процесів холодного об'ємного штампування на сучасних пресах-автоматах необхідно використовувати науково обґрунтовані методи та методики досліджень, які повинні враховувати специфіку процесу штампування кріплення, конструктивне виконання виробів, зміна властивостей штампувало сталей (зміцнення, вплив швидкості деформації на опір деформації і т.п.), особливості і технічні можливості обладнання, що застосовується, а також забезпечувати необхідну точність розрахунків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язане тематикою держбюджетних науково-

дослідницьких робіт НМетАУ: «Створення нових та удосконалення діючих технологій і обладнання для термічної і комбінованої обробки металовиробів відповідального призначення» (№ДР 0113U003263, Дніпро, 2012-2014рр.) та «Розробка нових технологічних параметрів процесу виробництва холоднодеформованих виробів з підвищеними службовими характеристиками на основі синергетики активної і циклічної деформації» (ДР 0115U0357123, Дніпро, 2017-2019рр.)

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є наукове обґрунтування та перевірка нової технології виготовлення високоміцних болтів із нелегованої низьковуглецевої сталі заснованої на способі деформаційного зміцнення заготівлі з послідуочим додатковим зміцненням болтів при холодному об'ємному штампуванні. Одночасно розглядалась задача вдосконалення способів здавальних випробувань готових болтів в порівнянні із існуючими, оскільки властивості готових виробів наряду зі структурним станом визначаються також геометрією виробу. Вирішення задачі удосконалення геометрії болтів з метою підвищення опору крихкому руйнуванню.

Для досягнення зазначеної мети проектом передбачається вирішення наступних завдань:

- розробка методики експериментального дослідження впливу активної та циклічної деформації на властивості модельних зразків;
- експериментальне дослідження впливу структурного стану на комплекс властивостей модельних зразків після активної та циклічної деформації;
- експериментальне дослідження впливу параметрів активної та циклічної деформації на службові характеристики холоднодеформованих кріпильних виробів;
- експериментальне дослідження додаткових низькотемпературних термічних впливів на службові характеристики холоднодеформованих кріпильних виробів. Визначення нових технологічних параметрів процесу отримання холоднодеформованих кріпильних виробів.

Об'єкт дослідження. Процеси формування структури та властивостей низьковуглецевої нелегованої сталі при комбінованому впливі активної та циклічної деформації, та вплив структурного стану на властивості металовиробів з концентраторами напруження.

Предмет дослідження. Закономірності впливу холодної активної та циклічної деформації на мікроструктури та механічні властивості прокату низьковуглецевої нелегованої сталі.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та вирішення сформульованих задач в роботі використані методи аналітичного аналізу; методи мікроструктурного та рентгеноструктурного аналізів; методи визначення механічних властивостей металевих виробів. Усі експериментальні дослідження виконані із використанням повіреного і сертифікованого обладнання та устаткування.

Наукова новизна одержаних результатів:

- набули подальшого розвитку принципи формування структури низьковуглецевої нелегованої сталі, що дозволило вперше обґрунтувати технологію отримання високоміцних кріпильних виробів шляхом поєднання холодної активної і циклічної деформації з термічними впливами на основі формування специфічного структурного стану на різних структурних рівнях;

- вперше показано, що характер впливу системи надрізів на властивості металевих виробів залежить від рівня їх зміцнення та запропоновано напівемпіричне рівняння, яке описує закономірність такого впливу системи надрізів;

- вперше запропоновані для болтів закономірності впливу їх масивності на опір крихкому руйнуванню і протилежний вплив масивності на опір в'язкому руйнуванню;

- вперше запропоновано та обґрунтовано характеристики опору в'язкому руйнуванню на основі використання умов макролокалізації пластичної деформації в навантаженому об'єкті.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані технологічні параметри у порівнянні зі стандартними технологічними параметрами отримання холоднодеформованих металовиробів масового призначення при одному рівні одержуваних службових характеристик дозволяють отримати економію в 40 - 50% на заготівлі в результаті заміни легованої сталі на звичайну вуглецеву. При цьому, запропоновані технологічні параметри процесу отримання холоднодеформованих виробів в порівнянні з чинними зараз технологіями підвищують значення службових характеристик на 20-40%, що додатково збільшує ефективність запропонованих технологічних рішень при одночасному зниженні їх собівартості зазначеній вище.

Результати дисертаційної роботи можуть використовуватись при проектуванні, будівництві та реконструкції промислових об'єктів наступними підприємствами: ТОВ «Придніпровський промстройпроект», ПАТ «Дніпропетровський завод металокопиркцій ім. І.В. Бабушкіна», ПАТ ПТП «Укренергочермет» та ТОВ завод «Энергокредо», а також при виробництві холоднодеформованих металовиробів масового призначення, таких як, холоднодеформовані кріпильні вироби на ПАТ «Дніпрометиз» та ПрАТ "Дружківський завод металевих виробів".

Очікуваний економічний ефект від впровадження запропонованої технології полягає насамперед у зменшенні вартості готової продукції на 40-50% за рахунок переходу від використання легованих сталей до використання низько вуглецевих нелегованих сталей, виключення операції термічного зміцнення кріпильних виробів (відсутні витрати на енергоносії та захисне середовище при термічній обробці, а також правку довгомірних кріпильних виробів), що призведе не тільки до підвищення конкурентоспроможності вітчизняного високоміцного кріплення, але і знизить витрати на будівництво об'єктів де застосовується даний вид кріплення.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи здобувачем одержані самостійно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві, автору належить розробка основних теоретичних

положень та лабораторних експериментів [1, 4-12]; підготовка планів та проведення експериментів, аналіз і обробка отриманих результатів [2, 3, 13-22].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи були представлені й обговорені на міжнародних науково-технічних конференціях: Стародубівські читання «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування» (Дніпро, 2015, 2016, 2017 рр.), 75-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, 2015), IV Всеукраїнська міжвузова науково-технічна конференція (Суми, 2015), Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2017: тези доповідей Дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 2017), II Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» (Хельсінкі, 2018), 7th International youth conference “Perspectives of science and education” (Нью-Йорк, 2019).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковані у 22 наукових працях: 1 стаття в закордонному журналі, включеному до НБД Scopus; 7 статей, що опубліковані у фахових виданнях за переліком МОН України; 3 закордонні статі, що не входять до переліку фахових; нові технічні рішення захищені 6-ма патентами України; 5 тезах доповідей на конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку літературних джерел з 102 найменувань і 2 додатків. Повний обсяг роботи викладений на 157 сторінках, у тому числі 113 сторінках основного тексту. Робота містить 43 рисунки і 24 таблиці.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ВИСОКОМІЦНИХ КРІПІЛЬНИХ ВИРОБІВ

1.1 Високоміцні кріпильні вироби та їх призначення

Високоміцні кріпильні вироби - це вироби, які володіють високою надійністю, розширеними функціональними і експлуатаційними властивостями, застосування яких забезпечує зниження матеріальних і трудових витрат при виготовленні, монтажі та експлуатації [1,2,3,4]. Надійність роботи нарізного сполучення значною мірою залежить від зусилля зтяжки при складанні та збереження цього зусилля в процесі експлуатації. Застосування кріплення підвищеної міцності дозволяє збільшити зусилля зтяжки. При цьому зменшується кількість встановлюваних виробів або зменшується їх діаметр, знижується металоємність машин і споруд, зменшуються трудовитрати при збірці і експлуатації. Відповідно до стандарту [5] до високоміцного кріплення відноситься кріплення класу 8.8 і вище. Так, наприклад, частка кріпильних деталей становить 60-65% від маси автомобіля. Одним з напрямків зниження витрати палива і рівня шкідливих викидів автомобілів є зменшення розмірів двигуна при збереженні тієї ж потужності і моменту кручення. Принцип зменшення розмірів базується на застосуванні умов навантаження більш високого рівня, які так чи інакше впливають на всі вузли двигуна. Виробники кріплення ставлять завдання сприяти цим розробкам шляхом зменшення розмірів кріплення, переходячи на кріплення розміром $\leq M10$.

За кордоном кріпильні вироби підвищеної міцності складають 90 ... 95% від загального обсягу виробництва, в той час як в країнах СНД частка кріплення підвищеної міцності становить 10-15% від загального випуску. Тому розширення виробництва і застосування кріпильних виробів підвищеної міцності є актуальною проблемою вітчизняної метизної промисловості.

Основні напрямки підвищення міцності кріпильних виробів пов'язані [6, 7]:

- із пошуком нових ефективних марок сталі, які добре штампуються, а вироби після термообробки володіють необхідним рівнем механічних властивостей;
- із використанням термозміцненого металу при холодному штампуванні без наступної термообробки виробів;
- із застосуванням термомеханічної обробки заготівлі в процесі її гарячого штампування;
- із використанням деформаційного зміцнення при холодному штампуванні виробів без подальшої їх термообробки.

За кордоном, а останнім часом і в нашій країні при виготовленні кріплення підвищеної міцності широке застосування знаходять сталі, які містять бор [8-23]. Мікролегування бором дозволяє отримувати економнолеговані сталі, експлуатаційні характеристики яких багато в чому не поступаються, а навіть перевершують рівень властивостей сталей, отриманих традиційним легуванням [24]. Низька розчинність бору в залізі, навіть при його незначних добавках (0,001-0,006%), призводить до випадання боридів, подрібнюючих зерно, що покращує прокалюємість і механічні властивості сталей. При цьому слід зазначити, що якщо для більшості легуючих елементів їх вплив на властивості сталей пропорційний кількості введеної добавки, то бор істотно підвищує якість сталі вже при його введенні в кількості $10^{-4} \dots 10^{-3} \%$. При таких добавках вплив бору на прокалюємість і в'язкість низько- і середньовуглецевих сталей відповідає результату, який досягається при легуванні хромом, марганцем, молібденом або нікелем, тільки в 100-300 разів перевищує добавки бору. Особливо ефективно введення бору в сталь в комплексі з іншими легуючими елементами (марганець, хром, нікель, титан, молібден і ін.), що забезпечує хорошу штампуємість в відпаленому стані і високий рівень механічних властивостей виробів після термообробки. Оскільки бор відрізняється порівняно високою спорідненістю до кисню і азоту, то для запобігання утворенню карбідів і нітридів бору, кисень і азот повинні бути пов'язані, для чого в сталь бажано вводити добавки алюмінію, кремнію, титану.

Таким чином, сталі, що містять бор в порівнянні з хромистими (35X, 38XA, 40X) мають менший опір деформації при холодному штампуванні, що забезпечує хорошу штампуємість і підвищення стійкості висадочних інструментів. Сталі, що містять бор, добре прогартовуються при охолодженні як у воді або водних розчинах, так і в маслі, а кріпильні вироби із них після термічної обробки володіють властивостями міцності на рівні кріплення з хромистих сталей при більш високих показниках пластичності і ударної в'язкості. Численні випробування показують, що кріпильні вироби з борвмісних сталей за механічними властивостями відповідають вимогам ГОСТ 1759-70 для класів міцності 8.8 ... 12.9 (болти) і 8 ... 12 (гайки).

Проблема підвищення міцності високоміцних болтів для монтажу сталевих будівельних конструкцій нерозривно пов'язана із запобіганням явища уповільненого крихкого руйнування (УКР) [25-29]. Природа і механізм УКР високоміцних болтів до кінця не вивчені. Це явище пов'язують з корозією під напругою і охрупчування в результаті проникнення атомарного водню атмосфери в мікропори на поверхні болтів і розвитком мікропор до утворення тріщини.

Для високоміцних болтів з рівнем міцності 1100-1300 МПа в ГОСТ 22356-77 закладена всього одна марка сталі - сталь 40X «селект», у якій звужений діапазон вмісту вуглецю (0,37- 0,42%). В даний час ця марка сталі добре апробована і при дотриманні певних режимів штампування і термообробки забезпечує високу експлуатаційну надійність виготовлених з неї високоміцних болтів. Однак сталь 40X «селект» володіє підвищеним опором деформації в холодному стані. Тому при виготовленні високоміцних болтів з цієї сталі найбільш ефективним способом - холодним штампуванням істотно знижується стійкість інструменту (особливо для обрізки на шестигранник та накатки різьби), а іноді має місце утворення тріщин на голівці. Термообробка болтів зі сталі 40X «селект» здійснюється в маслі, що погіршує стан навколишнього середовища. При термообробці на верхній рівень міцності 1300 МПа підвищується ймовірність крихкого руйнування.

Аналіз патентно-інформаційних матеріалів показав, що для виготовлення високоміцних болтів для монтажу будівельних металоконструкцій перспективно застосування борвмісних сталей типу 20Г2Р, 30ГР, 30Г2Р, 30ХР і кремніймарганцевістих сталей типу 20ГС, 30ГС, які необхідно закласти в ГОСТ 22356-77 після проведення відповідних досліджень і випробувань, особливо на уповільнене крихке руйнування.

1.2 Аналіз існуючих технологій виробництва кріпильної продукції підвищеної міцності

Аналіз технологій виробництва кріпильних виробів з міцністю понад 800 МПа, вживаних в даний час, свідчить, що найбільш поширеними схемами є наступні:

1. Виробництво гарячекатаного підкату - сфероїдизуючий відпал (може здійснюватися, як на металургійному, так і кордовому підприємстві) - волочіння - висадка кріпильних виробів - термічне поліпшення - рихтування і правка;
2. Виробництво підкату - термічне зміцнення підкату з окремого або прокатного нагріву - волочіння - висадка кріпильних виробів;
3. Виробництва гарячекатаного підкату - гарт з індукційного нагріву на двофазну структуру - волочіння - висадка кріпильних виробів.

Кожна схема має свої відмінні риси і складності в здійсненні і тому широко схема 1, яка добре вивчена і є свого роду базовою для багатьох метизних підприємств (рис. 1.1). У цій схемі основною витратною (енергоємною) операцією є сфероїдизуючий відпал.

Залежно від марки сталі, сортаменту підкату, і технології охолодження при виготовленні на металургійному переділі, відпал може проводитися протягом 6 ... 30 годин. Для зниження енерговитрат при підготовці структури металу до висадки кріпильних виробів удосконалюються печі для відпалу та сама технологія охолодження підкату в процесі виробництва. На рис.1.2 представлені сучасні ковпакові печі, які широко застосовуються в кріпильному виробництві ВАТ «Северсталь-метиз» [30].

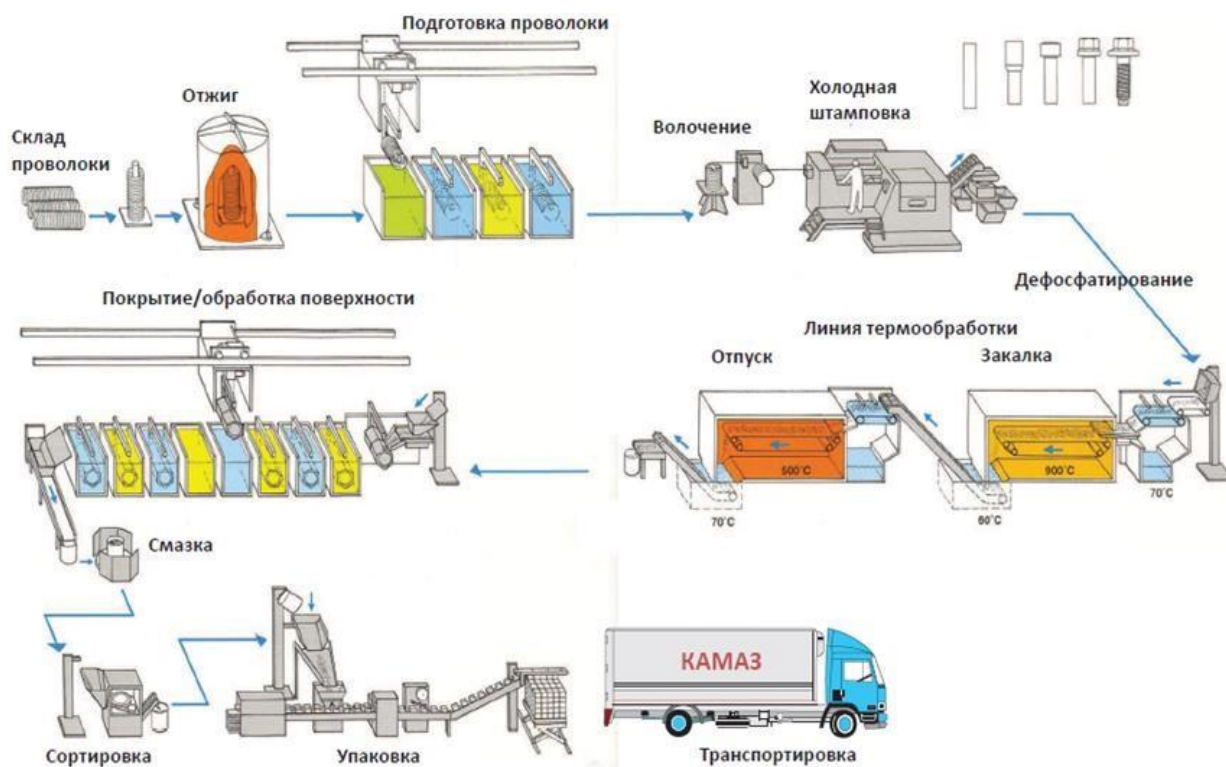


Рисунок 1.1 - Типова схема виробництва високоміцного кріплення [11]

Дослідження по розробці технологічно і економічно прийнятних режимів обробки підкату, які сприяють скороченню тривалості відпалу, тривалий час проводилися на кафедрі ТОМ Національної металургійної академії України. При цьому були розроблені, апробовані в промислових умовах і рекомендовані для промислового застосування кілька технологій сфероїдизації карбідів в сталях [31, 32].

Накопичений досвід дозволяє стверджувати, що в даний час найбільш технологічними і економічно прийнятними технологіями сфероїдизації карбідної фази в сталях, є технології комбінованих сфероїдизуючих обробок, що включають різні передобробки, які сприяють або швидкій сфероїдизації пластинчастих карбідів в глобули, або утворення карбідів глобулярної або точкової глобулярної морфології, і подальший короточасний сфероїдизуючий випал без - чи з фазової перекристалізацією, для коагуляції і коалесценції таких карбідів до необхідних розмірів і отримання твердості, відповідно до нормативно-технічних матеріалів на даний конкретний вид металопродукції.

Способи передобробок можуть бути самими різними і визначатися способом виробництва підкату (прокатка, кування, волочіння і ін.), типом і ступенем досконалості деформуючого обладнання, наявністю або відсутністю систем регламентованого охолодження металопрокату між клітьми і за чистової кліттю,



Рисунок 1.2 - Сучасні ковпакові печі для відпалу підкату

марками і класами сталей, видами металопрокату, його поперечним перерізом. Все це буде сприяти скороченню тривалості відпалу і втрат металу в окалину, а також зниження енерговитрат на підготовку заготовки до висадки.

Другою енерговитратною технологічною операцією при виробництві високоміцних кріпильних виробів за схемою 1 є сама термічна обробка готових виробів (гарт з відпуском). При цьому її проведення тягне за собою необхідність в подальших операціях промивки, рихтування і правці кріплення, які також вимагають витрат енергії. Створення сучасних гартівно-відпускних ліній для

термічної обробки кріплення дозволяє знизити витрати енергії на 10-15%, але вони як і раніше залишаються значними в собівартості виробництва.

Таким чином виникає проблема отримання високоміцних кріпильних виробів не тільки по характеристикам опору деформації при звичайних температурах, але за комплексом різних характеристик опору крихкому і в'язкому руйнуванню, втомі і іншим типам впливу при експлуатації. Зазначена проблема вирішується в основному за рахунок використання легованих сталей, а технологія отримання кріпильних виробів заданого класу міцності, яка регламентується відповідними стандартами, залишається незмінною, передбачаючи як зміцнюючу обробку класичне гартування на мартенсит з наступним відпуском готових по геометрії кріпильних виробів. Тому потенційні можливості отримання високоміцних кріпильних виробів з новим комплексом властивостей за рахунок формування нових структурних станів при економії легуючих елементів поки не використовуються. У той же час за останні 30 років запропоновані нові способи зміцнення кріпильних виробів, які, формуючи певний комплекс властивостей, виключають шкідливий вплив традиційної термообробки готових по геометрії кріпильних виробів на цю саму геометрію [33-40].

Підвищення міцності болтів деформаційним зміцненням досягається за рахунок використання підвищених ступенів деформації при калібруванні металу і холодному об'ємному штампуванні [41]. При цьому відпадає необхідність в зміцнюючій термообробці болтів і підвищується втомна міцність виробів за рахунок виникнення залишкових стискаючих напружень в різьбі. У технологічних процесах виготовлення кріплення підвищеної міцності з використанням деформаційного зміцнення ефективно застосування операції прямого видавлювання [42, 43]. Виготовлення кріпильних виробів підвищеної міцності методами холодної пластичної деформації пов'язано з ростом зусиль штампування, що необхідно враховувати при розробці технологічних процесів в частині вибору ковальсько-пресового устаткування і проектування

технологічного інструменту. Застосовувані методики визначення енергосилових параметрів повинні враховувати властивості штампувань сталей в залежності від режимів застосовуваних технологічних процесів (ступінь деформації, швидкість деформації і т.п.).

Однак, ці способи ще не отримали втілення в цілісні структурні схеми нових наскрізних технологій отримання високоміцних сталей кріпильні вироби від виплавки сталі до одержання і сертифікації готових сталей кріпильні вироби з використанням сучасних підходів до наповнення, організації та використання систем вхідного, оперативного і здавального контролю, як систем управління технологічним процесом з метою забезпечення випуску продукції на заданому рівні якості.

Результати аналізу структури традиційної (найбільш часто використовуємої) технології отримання високоміцних кріпильних виробів в порівнянні з новими, запропонованими, - представлені в таблиці 1.1. При цьому, як уже зазначалося вище, виходячи з доступної інформації, важко говорити про цілісну структуру нових технологій, тим більше наскрізних. При відповідному порівняльному аналізі розглянутих технічних рішень (ТР) - мова може йти про відмінності від традиційної технології на кшталт і логістики ТО зміцнюючої обробки (ЗО) в технологічному ланцюжку отримання високоміцних сталей кріпильних виробів. Як видно з таблиці, всі нові ТР: 1) виключають термічну обробку ЗО готових по геометрії сталей кріпильні вироби; 2) необхідна ступінь зміцнення досягається ЗО заготовки з подальшим використанням зміцнення при холодного об'ємного штампування (ХОШ). Таким чином, обладнання та режими деформації повинні обов'язково враховувати, що ХОШ піддається не гарячедеформована або піддана сфероїдизуючому відпалу заготовка, а зміцнена заготовка з якісно іншим СС. Цілком логічно думати, що отримуються сталей кріпильні вироби з використанням нових ТР вимагають додаткової релаксаційної обробки сталей кріпильні вироби після ХОШ для зменшення запасу пружної енергії і її градієнта, а також несприятливого впливу деформаційного

старіння. однак, як видно з таблиці, не всі нові ТР передбачають таку обробку; 3) зміцнення заготовки досягається або термічним зміцненням зі спеціального або прокатного нагріву (2ТМТО, 3ТМТО, 4ТМО по таблиці), або деформацією - теплою (5ТММ) або холодною (7НТМО); 4) в способі 6 ТМ використовується заготовка після сфероїдизуючого відпалу, тобто аналогічно технології 1Т, а необхідне зміцнення забезпечується тільки технологічної деформацією формозміни заготовки (ХОШ); 5) в способі 7 НТМО холоднодеформована заготовка піддається прискореному нагріву до аустенітного стану, в якому і здійснюється операція штампування, тобто ГОШ, а подальше потім при охолодженні мартенситне перетворення призводить до заданого зміцнення; 6) в більшості нових пропонованих способах отримання сталевих кріпильних виробів із класом міцності більш 8.8 використовуються середньовуглецеві і леговані сталі, а низьковуглецева сталь за способом 7 НТМО містить $\approx 7\%$ легуючих елементів; 7) елементи наскрізної технології найбільш виражені в традиційній технології Т, в якій також найбільш відпрацьовані системи вхідного і здавального контролю; 8) оперативна система контролю в її сучасному розумінні практично відсутній для всіх розглянутих варіантів.

Тільки застосування рядових марок сталей в поєднанні з новими технологіями підготовки підкату до холодної висадки дозволять знизити витрати на виробництво кріпильних виробів. Одним з ефективних шляхів в досягненні реальної економії є використання підкату з низьколегованої або низьковуглецевої сталі типу підданих деформаційному зміцненню під час волочіння.

1.3 Аналіз недоліків здавальних випробувань високоміцних кріпильних виробів, що нормуються нормативною документацією

Кількість стандартів на цей вид виробів становить зараз близько 280 найменувань. Масив стандартів містить в собі кілька груп, з яких в цьому матеріалі вирішено розглянути досягнення необхідних механічних властивостей

Таблиця 1.1 - Основні характеристики технологій і способів отримання високоміцних кріпильних виробів

Шифр технології чи методу	Характеристика заготовки (хімічний склад, структурний стан)	Вхідний контроль	Технологічні операції перед ХОШ	ХОШ	Технологічні операції після ХОШ	Оперативний контроль	Здавальний контроль	Наявність елементів наскрізної технології	Джерела
1 Т	Низько- і середньовуглецеві низьколеговані сталі. Гарячедеформовані або випалені	Хімісклад, геометрія, макроструктура, мікроструктура	Підготовка поверхні і калібрування волочинням (ε до 10%)	Стандартне обладнання та режими	Загартування на мартенсит + відпуск Нанесення захисного покриття	На стадіях 5 і 6	Вибірковий, відповідно до стандартів	+ Виражені на стадіях виплавки, розливання і гарячої прокатки	[12-14]
2 ТМТО	Низьковуглецеві нелеговані сталі, термічно зміцнені зі спеціального нагріву	Хімісклад?	Термічне зміцнення зі спеціального нагріву, підготовка поверхні, калібрування	Стандартне обладнання з корекцією режимів	Стабілізуючий відпуск при 400 - 450 ° С, поєднаний з оксидуванням	На стадіях 4 і 5	Теж саме	+ Узгодження операцій 4 і 5	[2-4]
3 ТМТО	Низьковуглецеві і низьколеговані сталі, термічно зміцнені з прокатного нагріву	Хімісклад?	Термічне зміцнення з прокатного нагріву, підготовка поверхні, калібрування	Теж саме	Старіння при температурах до 400 ° С поєднане з нанесенням покриттів	Теж саме	Теж саме	+ Теж саме	[5-6]
4 ТМО	Сталь 40Х термічно зміцнена зі спеціального нагріву	Хімісклад?	Термічне зміцнення (сорбітізація) зі спеціального нагріву, підготовка поверхні, калібрування	Теж саме	Стабілізуюча обробка відсутня	Теж саме	Теж саме	+ Теж саме	[7]

прод. табл. 1.1

Шифр технології чи методу	Характеристика заготовки (хімічний склад, структурний стан)	Вхідний контроль	Технологічні операції перед ХОШ	ХОШ	Технологічні операції після ХОШ	Оперативний контроль	Здавальний контроль	Наявність елементів наскрізної технології	Джерела
5 ТММ	Сталі 20 і 40. Ультрамелкі зерна, отримані рівноканальним кутовим пресуванням (РКУП)	Хімісклад, мікроструктура, тонка структура	Деформаційне зміцнення РКУП (до 8 проходів) підготовка поверхні, калібрування	Теж саме	Теж саме	Теж саме	Теж саме	Теж саме	[9]
6 ТМ	Сталь 40ХН2МА. Відпалена на зернистий цементит	Хімісклад, мікроструктура, визначення коефіцієнта штампуємості	Сфероїдизуючий випал, підготовка поверхні, калібрування	Підібрано оптимальний режим штампування	Нанесення гальванічним методом покриття з наступним відпуском при 200 ° С для видалення водню. Стабілізуюча холоднодеформованого стану обробка відсутня	На стадіях 3, 4 і 5	Теж саме	+ Узгодження операцій 3, 4 і 5	[10]
7 НТМО	Сталь 15Х3Г3МФТ Холоднодеформована на ротаційним куванням після гарту на мартенсит	Хімісклад?	Гаряча прокатка і вільне гаряче кування з наступним загартуванням на мартенсит і холодне ротаційне кування, потім швидкісний нагрів до аустенітного стану	ХОШ відсутня. Формування болта проводиться в аустенітному стані в процесі охолодження з подальшим мартенситним перетворенням	Можливе нанесення антикорозійного покриття. Стабілізуюча обробка відсутня	На стадіях 4 і 5	Теж саме	+ Узгодження операцій 4 і 5	[11]

(класу міцності) кріпильних виробів масового призначення в залежності від складу сировини і технології виготовлення. Про залежність якості і надійності збірки від технічного рівня і міцних властивостей кріпильних виробів є багато публікацій і немає сенсу їх повторювати. А ось завдання вдосконалення технологій, зниження трудомісткості і енергоємності виробництва, використання доступних, не дорогих сталей вирішуються поки повільно. При цьому саме діючі стандарти надають визначальне значення на собівартість кріпильних виробів і є перешкодою у виробництві конкурентоспроможної продукції.

Висловлене припущення пояснимо на прикладі виробництва болтів, шляхом аналізу діючого стандарту [5] з обґрунтуванням необхідності їх вдосконалення. За критерії оцінки приймемо досягнення підвищеної міцності з меншими витратами.

Відомо, що найбільш поширені класи міцності болтів, гвинтів і шпильок (далі - болтів) в Західній Європі такі: розміри до М10 включно 8.8 - 90%, 10.9 - 8%. Для болтів М12 і вище 8.8 - 31%, 10.9 - 61% [44]. Будемо орієнтуватися на ці співвідношення і розглянемо шляхи досягнення класів міцності 8.8; 9.8 і 10.9.

Стандарт, який встановлює класи міцності кріпильних виробів і їх механічні властивості за останні 40 років зазнав переважно лише зовнішні зміни, а також дроблення на окремі стандарти для болтів і гайок. При цьому технічні характеристики, що відносяться до класів міцності, і значення рівня їх механічних властивостей конкретних видів продукції майже не змінювалися.

Так, ГОСТ 1759.4-87 «Болти, гвинти та шпильки. Механічні властивості і методи випробувань» діяв майже 20 років. Потім його замінили на ДСТУ ІСО 898-1-2006 (Україна) і ІСО 898-1-2014 (Європа), адаптувавши згідно вимог правил національної стандартизації, без урахування нових досягнень науки і технологій, що відбулися за останні три десятиліття.

Виходячи з назви стандарту «Болти, гвинти та шпильки. Механічні властивості і методи випробувань» і керуючись здоровим глуздом, слід припускати, що в ньому повинні бути викладені вимоги за механічними

властивостями і методам їх визначення. Однак в стандарті також викладені (з неоднозначним трактуванням) ряд положень, які відносяться до вибору (призначенням) сировини (марки стали) і технології виготовлення болтів.

Розглянемо кілька вельми непростих вимог, що містяться віддавна в цих стандартах, які за своєю суттю, як сказано вище, суперечать назвою стандарту. Так в розділі 4 «Матеріали» в табл. 2 «Сталі» другий стовпець має назву «Матеріали і обробка». Його зміст викликає такі питання і пропозиції:

1. Стандарт згідно з назвою встановлює механічні властивості. Однак другий стовпець табл. 2 містить (тобто теж встановлює) ще й вимоги, що обмежують технологію - «загартована і відпущена» сталь. Ця вимога відноситься до болтів всіх класів міцності від 8.8 і вище і до наведених груп сталей: вуглецева, вуглецева з добавками, легована.

2. В даний стандарт не треба було б включати вимоги щодо технології досягнення механічних властивостей, тобто слова «загартована і відпущена». Це питання повинні вирішувати технологи при виробництві, можливо також узгодження з основними споживачами. Таким чином, стандарт диктує технологію зміцнення виробів, виключаючи інші можливі варіанти. Це не відповідає назві і призначенням стандарту, а також перешкоджає розробкам і застосуванню альтернативних технічних рішень.

3. Витяг з названої вище табл. 2 обговорюваного стандарту обмежує хімічний склад сталей, в тому числі, по вуглецю - «не менше». Це перешкоджає застосуванню інших, наприклад, маловуглецевих сталей марок 20, 10кп, а також низьколегованих сталей марок 20Г2 та ін. Є чималий досвід виготовлення з них кріпильних деталей класів міцності 8.8 - 10.9 за допомогою зміцнюючих технологій без операції гарту. Дослідження одержуваних кріпильних виробів показує їх гарантовану якість.

Такими формулюваннями стандарти ввели обмеження на вибір сировини для виробництва болтів класу 8.8 і вище, а саму технологію досягнення нормованих механічних властивостей заплутав до протиріч. Одними технологіями словосполучення «загартована і відпущена сталь» розуміється, як

потреба виконувати гартування і відпуск готових болтів, іншими дане трактується, як технологічна операція, виконана на вихідному прокаті. З урахуванням того, що вартість прокату для виробництва таких болтів зі сталі 40X і 20Г2Р різняться на 12%, а затрати на гартування і відпуск готових болтів складають 9,5% від собівартості [45], очевидно великий вплив цих факторів на кінцеву вартість готової продукції і її конкурентоспроможність на вітчизняному та світовому ринках.

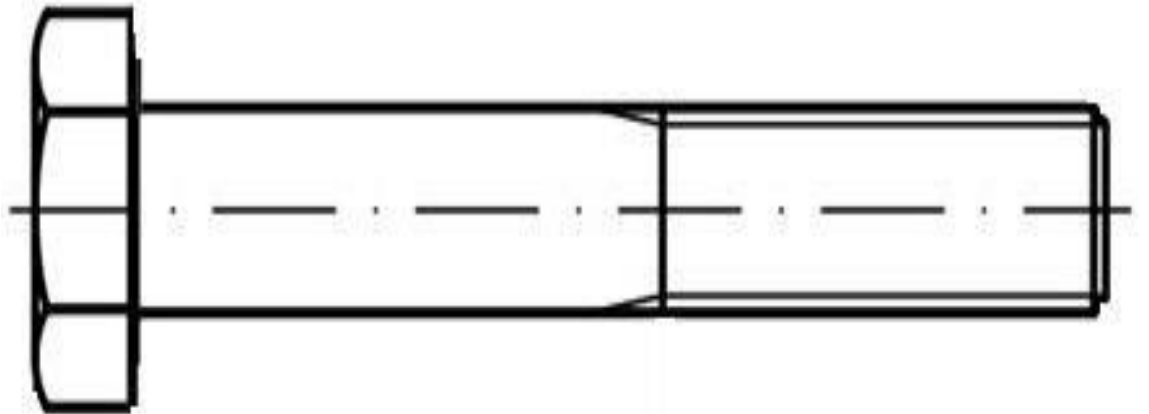
Комплекс механічних властивостей стрижневих кріпильних виробів після виготовлення регламентується згаданим вище НД [5], в яких передбачений контроль міцності і пластичних характеристик, які визначаються при одновісному розтязі, так і визначення межі міцності на розрив з перекосом (випробування на косій шайбі). Визначення комплексу міцності і пластичних характеристик регламентується проводити на зразках двох типів: готових кріпильних виробів (кріпильний виріб для якого були виконані всі технологічні операції повністю, з поверхневим покриттям або без нього, з повною або зменшеною здатністю навантаження, і випробувальний зразок не піддавався механічній обробці) і оброблених зразках (випробувальний зразок, виготовлений механічною обробкою з кріпильного виробу для визначення властивостей матеріалу) див. рис. 1.3. Однак слід зазначити, що на зразках двох типів передбачено визначення різних характеристик міцності і пластичності (табл. 1.2).

Як видно з наведеної таблиці при випробуванні готових кріпильних виробів визначається тільки межа міцності, інші ж характеристики міцності і пластичності визначаються на оброблених зразках, що призводить до неправильного визначення даних характеристик кріпильних виробів і занесенню в сертифікати якості готової продукції завідомо неправдивої інформації.

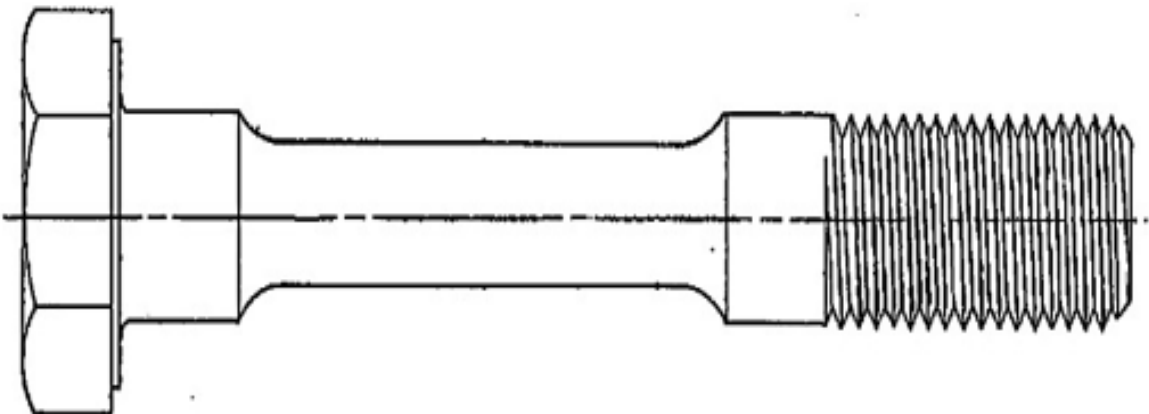
Регламентований рівень механічних властивостей кріпильних виробів нормований НД [5] наведено в таблиці 1.3, варто також відзначити що НД [5] є ідентичними європейським стандартом ISO 898-1-2014 і, отже дані показники механічних властивостей кріпильних виробів є дійсними як на території України,

так і за кордоном.

В основному всі методики проведення випробувань і визначення конкретних характеристик кріпильних виробів досить чітко регламентовані в НД [5] і відповідають міжнародним вимогам і полягають в:



а)



б)

Рисунок 1.3 - Готовий кріпильний виріб (а) і оброблений зразок (б) для визначення механічних властивостей болтів при випробуванні на розтяг

- випробування на розтягнення на косій шайбі готових болтів. Дане випробування служить для визначення межі міцності на розрив готових болтів і цілісності перехідної ділянки між головкою болта і гладким стрижнем або різьбленням.

Таблиця 1.2 - Перелік механічних властивостей визначаються на готових болтах і оброблених зразках

Тип зразку	Обумовлені механічні характеристики			
	Межа міцності, R_m , МПа	Межа плинності, R_{pf} , МПа	Відносне видовження після розриву, А, %	Відносне звуження після розриву, А, %
Готовий кріпильний виріб	+)*)	-	-	-
Оброблені зразки	+	+	+	+

*) – визначається при випробуванні на одновісний розтяг і при випробуванні готового кріпильного виробу на косій шайбі. У стандарті не вказано який з результатів визначення R_m необхідно вносити в сертифікати якості кріпильних

Таблиця 1.3 - Критичний рівень механічних властивостей кріпильних виробів

Механічні властивості	Клас міцності						
	5.8	6.8	8.8	8.8	9.8 $d \leq 16$ мм	10.9	12.9
			$d \leq 16$ мм	$d \geq 16$ мм			
Межа міцності на розтяг, R_m , МПа	520	600	800	830	900	1040	1220
Умовна межа плинності при залишковому подовженні 0,2%, $R_{p0.2}$, МПа	-	-	640	660	720	940	1100
Умовна межа плинності при залишковому подовженні $0,0048d$ для повнорозмірного кріпильного виробу *) , R_{pf} , МПа	420	480	-	-	-	-	-
Напруга від пробного навантаження S_p^f , МПа	380	440	580	600	650	830	970
Відносне видовження після розриву для обробленого випробувального зразка А, %	-	-	12	12	10	9	8

Механічні властивості	Клас міцності						
	5.8	6.8	8.8	8.8	9.8	10.9	12.9
			d≤16 мм	d≥16 мм	d≤16 мм		
Відносне звуження площі після розриву для обробленого випробувального зразка Z, %	-	-	52		48	48	44
Видовження після розриву для повнорозмірного кріпильного виробу, A _f	0,22	0,20	-	-	-	-	-
Твердість по Віккерсу, HV	160-220	190-250	250-320	255-335	290-360	320-380	385-435
Твердість по Бринеллю, HBV	152-209	181-238	245-316	250-331	286-355	316-375	380-429
Твердість по Роквеллу, HRB	82-95	89-99,5	-	-	-	-	-
Твердість по Роквеллу, HRC	-	-	22-32	23-34	28-37	32-39	39-44
Ударна в'язкість (робота удару) K _v ¹⁾ , Дж	-	-	27	27	27	27	-

*) - повнорозмірний кріпильний виріб: готовий кріпильний виріб з діаметром гладкої частини стрижня $d_s \approx d$ або $d_s > d$

- випробування на розтягнення готових болтів, гвинтів і шпильок проводять для визначення межі міцності на розтяг.

- випробування на розтягнення повнорозмірних болтів для визначення подовження після розриву A_f і умовної границі плинності R_{pf} при залишковому подовженні 0,0048d.

- випробування на розтягнення болтів у яких не передбачається руйнування на вільній довжині різьблення через конструкції головки;

- випробування на розтягнення кріпильних виробів з тонким

стрижнем;

- визначення межі міцності на розтягнення кріпильних виробів з тонким стрижнем;

- випробування пробним навантаженням готових болтів - проводиться для визначення залишкового подовження після додатки пробного навантаження;

- випробування на розтягнення оброблених випробувальних зразків - проводиться для визначення умовної межі текучості, межі міцності, відносного подовження і відносного звуження після розриву;

- випробування головки на міцність - проводиться для перевірки цілісності перехідної ділянки між головкою болта і гладким стрижнем або різьбленням;

- випробування на твердість. Твердість перевіряють на будь-якій зручній поверхні або на поперечному зрізі нарізного ділянки. Твердість може бути визначена з використанням випробувань на твердість по Віккерсу, Бринеллю або Роквеллу;

- випробування на знеуглецювання - проводиться для виявлення знеуглецьованого шару на поверхні загартованого і відпущеного кріплення, а також його глибини. Зниження вмісту вуглецю (знеуглецювання) внаслідок термічної обробки може зменшити міцність різьби і стати причиною руйнування. Вміст вуглецю на поверхні може бути визначено одним із таких методів: металографічним методом; методом вимірювання твердості.

- випробування на повторний відпуск - перевірка мінімальної температури відпуску досягнутої в процесі термічної обробки. Повторний відпуск кріпильного виробу проводять протягом 30 хв при температурі на 10°C менше, ніж мінімальна температура відпуску, встановлена цим стандартом.

Після повторного відпуску необхідно визначити твердість по Віккерсу проведенням трьох нових вимірів на тому ж самому зразку кріпильного виробу і в тій же області, як при першому визначенні. Слід порівняти середні значення

- трьох вимірів твердості до і після повторного відпуску. Зменшення

твердості після повторного відпуску має бути не більше 20 одиниць по Віккерсу.

- випробування на крутіння. Дане випробування призначене для визначення руйнівного моменту болтів з різьбленням від М3 до М10, які неможливо випробувати на розтяг або пробним навантаженням через їхню малу довжину. В даний час мінімальні руйнівні моменти можна встановити тільки для болтів класу міцності 8.8 - 12.9, оскільки для більш низьких класів міцності результати випробувань мають великий розкид, і тому потрібні додаткові дослідження;

- випробування на ударний вигин оброблених випробувальних зразків - визначається міцність матеріалу кріпильного виробу ударним навантаженням при встановленій низькій температурі.

При цьому, є ряд очевидних нарікань:

- розглянені стандарти на механічні властивості і методи випробувань болтів, гвинтів і шпильок не відповідають сучасному рівню розвитку випробувальної техніки через присутність таких методів випробування, як удар молотком по голівці болта, як випробування розтягуванням до пробного навантаження, як визначення ряду характеристик на оброблених (обточених) зразках;

- визначення механічних властивостей кріпильних виробів (болтів, гвинтів, шпильок) шляхом випробування оброблених (обточених) зразків спотворює дійсні значення характеристик і може призводити до неправильного призначення класу міцності готової продукції;

- після проведення випробування контрольних зразків (болтів) на розтяг в документ про якість повинні вноситися значення характеристики тимчасового опору розриву, отриманого при випробуванні готових болтів;

- випробування готових болтів на розтяг із записом діаграми дає можливість візуально оцінювати виконання вимог по випробуванню пробним навантаженням.

Виходячи з наведеного вище очевидно, що чинні стандарти, в яких викладені вимоги на механічні властивості і методи випробувань кріплення не

відповідають поняттю нормативного документа в світлі регламенту щодо вибору сировини і технології виготовлення кріпильних виробів, що має вибиратися виробником. Вони обмежують і ускладнюють застосування нових, менш трудомістких і екологічно чистих технологій. Також дані нормативні документи підлягають переробці через наявність вимог до визначення механічних випробувань на двох різних типах зразків, що призводить до великої похибки випробувань, особливо визначення межі плинності, яка лежить в основі розрахунку на міцність різьбових з'єднань.

На основі результатів літературного аналізу розроблено задачі дослідження в дисертаційній роботі, які передбачають:

1. Визначення найбільш раціональних параметрів активної та циклічної деформації в поєднанні з низькотемпературним термічним впливом при виготовленні високоміцних кріпильних виробів;

1. Визначення оптимального хімічного складу сталі для виготовлення високоміцних кріпильних виробів без застосування фінішного термічного зміцнення;

2. Проведення дослідження впливу типу зразків для визначення механічних властивостей кріпильних виробів та формулювання пропозицій для усунення недоліків існуючих стандартів;

3. Розроблення нових методик визначення механічних властивостей кріпильних виробів та методів підвищення їх експлуатаційних характеристик;

4. Аналіз техніко-економічних показників виробництва високоміцних кріпильних виробів без фінішного термічного зміцнення.

1.4 Висновки по розділу 1

1. На основі літературного аналізу показано, що сучасний підхід до технології виробництва високоміцних кріпильних виробів не враховує можливість використання низьковуглецевих нелегованих сталей та формування нового структурного стану при зміцненні холодною деформацією при

використанні нових принципів взаємодії дефектів кристалічної будови в процесі холодної пластичної деформації. При цьому комплекс властивостей таких виробів характеризується поєднанням заданого рівня зміцнення з необхідними рівнями опору крихкому, в'язкому і втомному руйнуванню, а деформаційне старіння таких холоднодеформованих виробів не призводить до неприпустимого погіршення їх властивостей.

2. Використання при виробництві високоміцних кріпильних виробів деформаційного зміцнення замість термічного дозволяє використовувати низьковуглецеві сталі, що дозволяє значно знизити вартість виробництва та підвищити екологічність процесу.

3. В результаті аналізу діючих нормативних документів на кріпильні вироби встановлено, що механічні властивості визначаються на двох типах зразків, а саме обточених зразках та готових кріпильних виробах. Данні методики призводять для спотворення отриманих результатів та не дозволяють отримати характеристики, що відповідають умовам експлуатації. Отже методики в діючих нормативних документах є застарілими та вимагають вдосконалення.

1.5 Список використаних джерел і розділі 1.

У розділі 1 використані джерела [1-45]. Їх найменування представлені у загальному списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування вибору матеріалу дослідження

На даний час виробами (продукцією) масового призначення, що виготовляють методом зміцненням холодною деформацією є кріпильні вироби (болти, шпильки і гайки). При цьому на сортамент болтів, шпильок, гайок розміром М6...М16 припадає понад 60% від загального обсягу виробництва.

За цих обставин визначення сортаментних рядів промислових зразків ефективних для проведення запланованого дослідження треба проводити з урахуванням наявності сировини (прокату), що зберігається в мотках на вітчизняних металургійних підприємствах.

Виходячи з реального сортаменту прокату (катанки) діаметром 6,0 ... 18,0 мм в мотках (продукція дротяної лінії, запущеної в експлуатацію в 2014р. на ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат», м. Кам'янське), наявного на ринку України, на метизному переділі в даний час може обиратися продукція сортаменту, який наведений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Сортамент метизної продукції, яка виготовляється методом зміцнення холодною деформацією

Діаметр прокату, мм	Діаметр заготовки, мм /ступінь деформації, %	Види і розмір продукції		
		Гайка	Болт	Шпилька
6,0	5,60 / 55,6-12,9	-	М6	М6
8,0	7,40 / 14,4	-	М8	М8
9,0	8,60 / 8,7	М6	-	-
10,0	9,50 / 9,8	-	М10	М10
11,0	10,40 / 10,6	М8	-	-
12,0	11,50 / 8,7	-	М12	М12
14,0	13,30 / 9,8	М10	-	-
14,5	13,45 / 14,0	-	М14	М14
15,0	14,25 / 9,8	М12	-	-
16,0	15,40 / 7,4-12,0	М14	М16	М16

Для досягнення енергозбереження у виробничому циклі виготовлення каліброваної круглої заготовки і готової продукції пропонується вилучити ряд технологічних операцій, пов'язаних зі споживанням газу та електричної енергії:

- відпал гарячекатаного прокату;
- гартування кріплення.

Для дослідження ресурсозберігаючої технології в якості сировини використовували круглий прокат (катанку) діаметром 6,0 ... 18,0 мм в мотках з рядової низьковуглецевої сталі 20 за ГОСТ 1050 – 88 [46], фактичний хімічний склад якої було визначено на атомно-емісійному спектрометрі “Spectromax X” (таблиця 2.2). Вартість передільного круглого прокату підвищеної міцності з низьковуглецевої сталі менша, ніж за ДСТУ ISO 898-1:2015 [5]. Такі заходи забезпечать значне зниження собівартості виробництва кріплення і дозволять отримати продукцію конкурентну за ціною і якістю навіть з аналогічною продукцією Південно-Східної Азії.

Таблиця 2.2 - Хімічний склад досліджуваної сталі

Марка сталі	Хімічний склад, мас. доля елем., %				
	C	Mn	Si	S	P
20кп	0,18	0,35	<0,01	0,016	0,008
Вимоги до хімічного складу за ГОСТ 1050-88	0.17 - 0.24	0.25 - 0.5	<0,07	<0,04	<0,035

Для вивчення впливу системи надрізів на механічні властивості кріпильних виробів були використані болти розмірами M12x1,75x80 мм, M12x1,75x70 мм, M12x1,5x80 мм, M12x1,75x100 мм з низьковуглецевих, а також низьколегованих сталей (ГОСТ 10702 – 78 [47]), отримані холодною висадкою і термічною обробкою за стандартними технологіями метизних підприємств, а також

за деякими дослідним режимам з метою отримання комплексу механічних властивостей в інтервалі 4.8 - 10.9 класів міцності. В таблиці 2.3 наведено вимоги до хімічно складу сталей згідно стандартів [46, 47] та фактичний хімічний склад визначений на атомно-емісійному спектрометрі "Spetromax X".

Проведення механічних випробувань проводилось як готових (повнорозмірних болтів без зміни їх геометрії) кріпильних виробів так і обточених зразків на діаметр 10 - 8 мм.

2.2 Методика проведення дослідження нової технології виробництва високоміцних кріпильних виробів

Для виготовлення кріплення зазначеного сортаменту в якості сировини використовувалася катанка з низьковуглецевої сталі діаметром 9 мм (для М6) і 11 мм (для М8). При підготовці вихідної заготовки катанку піддавали волочінню із загальною деформацією 31,6-59,1%.

Заготівлю для болтів М8 готували за схемою:

катанка $\varnothing 11,0$ мм \rightarrow волочіння в монолітній волоці на $\varnothing 9,50$ мм \rightarrow волочіння в монолітній волоці на 8,0 мм (загальна деформація $\varepsilon \approx 47\%$) + додаткове температурний вплив на заготовку (старіння в камерної електропечі Н 60 при 400 °С протягом 1 год.) \rightarrow волочіння в монолітній волоці на $\varnothing 7,44$ мм ($\varepsilon \approx 13\%$) + додаткові деформаційні і температурні впливи на заготовку:

- а) + старіння при 400 °С протягом 1 год;
- б) + МЦО в пристрої, встановленому в потоці стану №9 2500/2 "SKET", де виготовляється ХД арматура (рис. 2.1);
- в) + МЦО + старіння при 400 °С протягом 1 год.

Заготівлю для болтів М6 готували за схемою:

катанка $\varnothing 6,5$ мм * \rightarrow волочіння в монолітній волоці на $\varnothing 6,0$ мм (деформація $\varepsilon \approx 15\%$) + додатковий температурний вплив на заготовку (старіння в камерної електропечі Н-60 при 400 °С протягом 1 год.) \rightarrow волочіння в монолітній волоці на $\varnothing 5,60$ мм ($\varepsilon \approx 13\%$) + додаткові деформаційні і температурні впливи на заготовку:

Таблиця 2.3 – Хімічний склад сталей досліджуваних болтів М12

Марка сталі	Масова доля елементів, %													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	V	B	N
15кп	0,141	0,0075	0,419	0,012	0,01	0,054	0,037	0,007	0,063	0,03	0,0067	0,001	0,0011	0,002
Вимоги за [46]	0,12-0,19	<0,07	0,25-0,5	<0,04	<0,035	<0,25	<0,3	-	-	<0,3	-	-	-	-
Ст3пс	0,173	0,069	0,58	0,012	0,016	0,042	0,038	0,0068	0,0074	0,021	0,0012	0,001	0,0014	0,0037
Вимоги за [46]	0,14-0,22	0,05-0,15	0,4-0,65	<0,04	<0,05	<0,3	<0,3	-	-	<0,3	-	-	-	<0,008
20Г2	0,214	0,211	1,51	0,014	0,012	0,033	0,043	0,0075	0,011	0,038	0,014	0,001	0,0025	0,0033
Вимоги за [47]	0,18-0,26	0,17-0,37	1,3-1,6	<0,035	<0,035	<0,25	-	-	-	<0,2	-	-	-	-
10Г2	0,097	0,119	1,26	0,0088	0,0043	0,269	0,049	0,0087	0,048	0,059	0,019	0,001	0,0013	0,0068
Вимоги за [47]	0,07-0,15	0,17-0,37	1,2-1,6	<0,035	<0,035	<0,3	-	-	-	<0,3	-	-	-	-
Ст5пс	0,311	0,128	0,499	0,017	0,0051	0,037	0,039	0,0075	0,0026	0,048	0,0008	0,001	0,0009	0,0035
Вимоги за [46]	0,28-0,37	0,05-0,15	0,5-0,8	<0,04	<0,05	<0,3	<0,3	-	-	<0,3	-	-	-	<0,008
30Г	0,36	0,16	0,7	0,019	0,006	0,025	0,009	0,005	0,016	0,02	0,005	0,005	0,0055	0,014
Вимоги за [47]	0,27-0,35	0,17-0,37	0,7-1,0	<0,035	<0,035	<0,3	<0,3	-	-	<0,3	-	-	-	-
20Г	0,23	0,058	0,97	0,009	0,005	0,27	0,03	0,006	0,032	0,043	0,027	0,005	0,012	0,011
Вимоги за [47]	0,17-0,24	0,17-0,37	0,7-1,0	<0,035	<0,035	<0,3	<0,3	-	-	<0,3	-	-	-	-
20Г2	0,25	0,105	1,21	0,006	0,007	0,25	0,028	0,005	0,024	0,035	0,016	0,005	0,013	0,007
Вимоги за [47]	0,18-0,26	0,17-0,37	1,3-1,6	<0,035	<0,035	<0,25	-	-	-	<0,2	-	-	-	-

- а) + старіння при 400 °С протягом 1 год .;
- б) + МЦО в пристрої, встановленому в потоці стану;
- в) + МЦО ++ старіння при 400 °С

Далі → висадка болтів М6 та М8 з заготовки по пп. а, б і в в умовах кріпильних цехів підприємств ПАТ «Дніпрометиз» та ПрАТ "Дружківський завод металевих виробів" на автоматах АВ1918, АВ1919Б та автоматах серії «LeanFX» виробництва «NationalMachinery», США.

Контроль механічних властивостей отриманих кріпильних виробів був проведений з визначенням межі плинності та міцності згідно ДСТУ ISO 898-1:2015 [5].

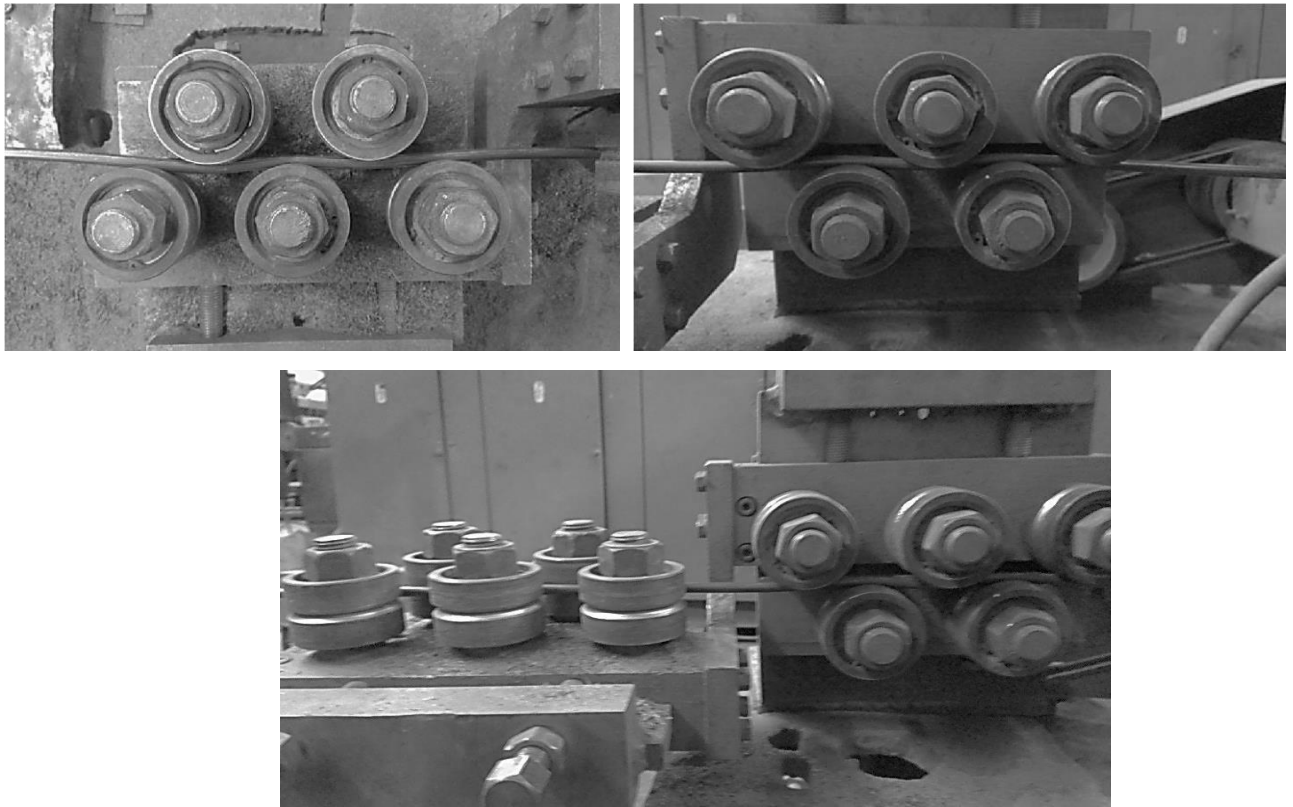


Рисунок 2.1 - Пристрій для механо-циклічної обробки каліброваної заготовки $\varnothing 7,44$ мм

2.3 Методика механічних випробувань

Випробування на одноосьовий розтяг проводилось згідно чинної нормативної документації ДСТУ ISO 6892-1 [48]. Використовувалась машина

типу FP - 100/1, зразки розміщували в спеціальних захватах, навантаження проводили при швидкості переміщення захватів 1 мм/хв із записом повної діаграми деформації і руйнування. Крім стандартних характеристик, які визначаються при статичному одноосьовому розтягуванні: межа плинності (σ_T), межа міцності (σ_B) та повне відносне видовження (δ_{zar}) особлива увагу зверталась на рівномірне видовження (δ_p), що трактується як характеристика опору переходу до макролокалізації пластичної деформації при навантаженні, і на умовну характеристику швидкості падіння навантаження (номінальної напруги) на ділянці локалізованої деформації. Ця характеристика визначалась як відношення падіння навантаження (номінальної напруги) ΔP ($\Delta\sigma_{ном}$) від її максимального значення до відповідного моменту руйнування до значення подовження на цій ділянці діаграми ($\delta_{лок}$). Тип руйнування при зазначених випробуваннях визначалось по виду діаграм розтягування.

2.4 Методика металографічних досліджень

Приготування металографічних мікрошліфів для структурного аналізу виконувалось відповідно до нормативних вимог ASTM E3 [49].

Шліфування здійснювалось шляхом стирання поверхні зразку при послідовному переході до більш дрібнозернистого абразивного матеріалу. Абразивні матеріали зазвичай класифікують за розміром комірки (вічка) сита: матеріали з розміром часток 40-150 меш прийнято відносити до групи грубозернистих абразивних матеріалів, тоді як матеріали з розміром часток 180-600 меш утворюють групу дрібнозернистих абразивних матеріалів. Шліфування починалось з самого крупнозернистого абразивного матеріалу, який здібний достатньо швидко створити початкову рівну поверхню зразку та зняти ефект розрізання. Кожна подальша операція шліфування проводилась на все більш дрібнозернистому абразивному матеріалі. Перехід проводився до подальшого за розміром часток абразивного матеріалу (перехід більш ніж на один розмір, не рекомендується). Виконаний процес шліфування включав послідовний ряд

абразивних матеріалів з розміром часток 180, 240, 400, 600, 800 та 1000 меш. Всі операції шліфування проводились «мокрим» способом. Мокре шліфування в значній мірі оберігає абразивний матеріал від забруднення частками матеріалу, який обробляється. Струї води змивають з поверхні зразку частки, що утворюються при шліфовці, перш ніж вони встигнуть впровадитися між частками абразиву. Саме тому поверхня шліфа піддається дії гострих країв абразивних часток на протязі всього часу шліфування. Якщо гострі краї часток не виступають назовні через забруднення абразивного матеріалу продуктами обробки, то замість видалення поверхневого шару металу здійснюється «замазування» шліфованої поверхні. Мокра шліфовка забезпечує, крім того, ефективно попередження перегріву зразку.

Операція травлення металографічних шліфів включає всі процеси, що розроблені для виявлення специфічних структурних складових зразку, які не видимі на полірованій та не травленій поверхні шліфа.

Хімічне травлення здійснювалось шляхом занурення зразку у травитель або протиранням зразку реактивом доти, поки не виявиться бажана структура. Травлення проводилось в чашках Петрі 5 %-вим спиртовим розчином (або 3%-вим водним розчином) азотної кислоти (ніталь), що дає змогу багаторазової переполіровки та травлення. Дослідження, аналіз і фотографування металографічних шліфів проводили на металографічному мікроскопі «Неофот-21».

2.5 Методика рентгеноструктурного дослідження

Дослідження проводилися на холоднодеформованій заготовці із сталі 20кп. Зйомка дифрактограм проводилася в Со-Ка випромінюванні з записом ліній (110) и (220) на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2.

Заготовка досліджувалась в наступних станах: $\emptyset 11\text{мм}$, $\emptyset 9,5\text{мм}$, $\emptyset 8\text{мм}$, $\emptyset 7,4\text{мм} + 400^\circ\text{C}$, $\emptyset 7,4\text{мм} + \text{механо-циклічна обробка}$, $\emptyset 7,4\text{мм} + \text{механо-циклічна обробка} + 400^\circ\text{C}$.

В якості еталона використовувався зразок зі відпаленою структурою при

температурі 0,3Тпл α -Fe. Параметри еталону наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Параметри тонкої структури еталона

№ обр.	Тип зразка	a, нм	$\beta_{(110)}$	$\beta_{(220)}$	$L_{(110)}$, Å	$L_{(220)}$, Å	$\rho_{(220)} \cdot 10^6$, см ⁻²
0-0-0	Еталон α -Fe	2.8658	0,18	0,362	1273	1906	4,93

За отриманими дифрактограмами визначалися наступні характеристики:

a – параметр ґратки, нм;

$\beta_{(110)}$, $\beta_{(220)}$ – фізичне розширення ліній (110) и (220) відповідно, рад;

$L_{(110)}$, $L_{(220)}$ – розмір блоків мозаїки (ОКР), Å;

$\rho_{(220)}$ – щільність дислокацій, $\times 10^{10}$, см⁻²;

$\Delta a/a$ – розмір мікронапружень, $\times 10^{-3}$

Розмір області когерентного розсіювання (ОКР) визначався по формулі Селякова-Шеррера:

$$L = n\lambda/\beta \cdot \cos\theta, \quad (2.1)$$

де L - розмір ОКР в ангстремах;

λ – довжина хвилі випромінювання;

θ - кут розсіювання;

β – фізичне розширення ліній на дифрактограмі в радіанах (в шкалі 2θ);

n - коефіцієнт, залежний від форми частки і близький до 1, 0,94 для рентгеноструктурного аналізу.

Практично визначити розміри ОКР по наведеній формулі можливо в межах від 1500-2000 Å до 15-20 Å, причому в різних кристалографічних напрямках.

Щільність дислокацій визначалась по формулі:

$$\rho = A \cdot \beta_{(110)}^2, \quad (2.2)$$

де β – ширина лінії на менших θ , рад;

A – коефіцієнт, який визначає співвідношення крайових та гвинтових дислокацій, тип кристалічної ґратки, індекси лінії (110) і (220), значення пружних характеристик досліджуваного матеріалу. Для сплавів на основі заліза $A \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Похибка вимірювання : +0,15 рад.

2.6 Методика дослідження тонкої структури

Дослідження тонкої структури проводилося методом просвічуючої електронної мікроскопії на установці JEOL JEM-4000EX з визначенням типу дислокаційної структури. Просвічуюча електронна мікроскопія заснована на формуванні збільшеного зображення об'єкта потоком електронів, що пройшли крізь об'єкт.

Для вивчення тонкої структури зразків використовувався прямий метод, який полягає в безпосередньому вивченні структури досліджуваного матеріалу в вигляді тонкої плівки або фольги товщиною, прозорою для пучка електронів. В цьому випадку досліджуваний об'єкт і просвічує препарат ідентичні з точки зору хімічного складу і кристалічної структури.

Приймаючи до уваги той факт, що поставлена в роботі мета розробки нових технологічних параметрів процесу виробництва холоднодеформованих виробів з підвищеними службовими характеристиками вирішується на основі синергетики активної і циклічної деформації, актуальним є структурний аналіз об'єктів дослідження з точки зору вивчення структурних наслідків обробки виробів тиском – дислокаційної структури, двійників, смуг ковзання і т. ін. Для ефективного та якісного виявлення таких структурних елементів, використовувався наступний спосіб травлення – для виявлення смуг ковзання у феритних зернах деформованих низьковуглецевих сталей – реактив Фрая: 40 мл HCl, 5 г CuCl₂, 25 мл C₂H₅OH, 30 мл H₂O. Попередньо відпущений при 150-200 °С зразок занурюється в холодний реактив на 10 ... 15 с, після чого промивається етиловим спиртом. Промивання водою не рекомендоване, тому що мідний осад може потьмяніти.

2.7 Висновки по розділу 2

В розділі обґрунтований вибір матеріалу і застосованих методів, методик і устаткування для досліджень. Структуру зразків металу вивчали методами якісної світлової мікроскопії на оптичному мікроскопі «Неофот-21». Вивчення тонкої структури проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2 та методом просвічуючої електронної мікроскопії на установці JEOL JEM-4000EX.

Випробування на розтяг проведені за ДСТУ ISO 898-1:2015 на універсальній машині FP-100/1.

Всі випробування проведені на стандартному устаткуванні, яке своєчасно пройшло атестацію в регіональних установах стандартизації України, що забезпечує необхідний рівень вимірювання досліджуваних характеристик.

2.8. Список використаних джерел в розділі 2

У розділі 2 використані джерела [5, 46-48]. Їх найменування представлені у загальному списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА НОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА СТАЛЕВИХ ВИСОКОМІЦНИХ КРІПІЛЬНИХ ВИРОБІВ

Перспективною і маловивченою в даний час є розробка нових способів виробництва високоміцного кріплення заснованих на використанні для досягнення необхідного рівня механічних властивостей тільки деформаційним зміцненням активною деформацією здійснюваною в процесі штампування кріпильних виробів, а застосування циклічної деформації при підготовці прокату перед висадкою дозволяє знизити зусилля волочіння на 40 - 60% і підвищити пластичність катанки, що в свою чергу дозволяє використовувати для виготовлення кріплення катанки з більш високою міцністю не збільшуючи навантаження на інструмент.

Для виробництва високоміцних сталевих кріпильних виробів в даній роботі був запропонований спосіб їх виробництва, який поєднує процеси активної і циклічної деформації на стадії виробництва заготівлі з низькотемпературним термічним впливом. Дане поєднання дозволяє за рахунок деформаційного зміцнення отримати прокат з підвищеними характеристиками міцності: межа міцності на рівні - 700 МПа, межа плинності - 640 МПа, що дозволяє за рахунок деформаційного зміцнення при холодному об'ємному штампуванні отримати болти класу міцності 8.8 і вище.

Деформаційне зміцнення заготівлі не має зазначених в попередньому розділі недоліків термічного зміцнення. Крім того, використання цього виду зміцнення дає кращі можливості індивідуалізації обробки заготівлі в межах партії, оперативного контролю структурного стану і властивостей заготівлі перед холодним об'ємним штампуванням, забезпечує кращу чистоту поверхні і точність геометрії заготівлі, а також більш високий рівень екологічності процесу. Деформаційне зміцнення заготівлі в поєднанні з зміцненням при холодному об'ємному штампуванні кардинально змінює формування

структурного стану кріплення в результаті різних деформаційних впливів в порівнянні з традиційною технологією і - істотно - з технологією, що включає термічне зміцнення заготівлі. Можливо обґрунтовано вважати, що використання переважно деформаційних впливів при отриманні високоміцного кріплення гарантує велику надійність такого кріплення в умовах експлуатаційних деформаційних впливів.

Метою даного розділу є теоретичне і експериментальне дослідження впливу активної і циклічної деформації на властивості заготівлі для холодного об'ємного штампування на підставі аналізу комплексу механічних властивостей заготівлі і готових болтів отриманих за пропонованою технологією.

3.1 Вплив ступеня деформування при волочінні на структуру, твердість, міцність і пластичні характеристики

У ряді досліджень процесу волочіння [49] уточнювалися умови пластичної течії металу при деформації в різних умовах. Показано, що пластична деформація при волочінні в холодному стані викликає підвищення опору деформації, причому підвищення тим значніше, чим більше ступінь обтиску при волочінні [49]. Відомо [50], що висока температура прокату під час волочіння в інструменті волочильного стану призводить до розвитку процесів старіння, викликають зниження пластичних характеристик, виникнення температурних напружень в ньому, утворення ділянок мартенситу на поверхні дроту, зниження стійкості інструменту, окислення мастила і підвищенню коефіцієнта тертя під час волочіння і, як наслідок, виникнення несприятливих умов для процесу деформації і якості кінцевого продукту - каліброваного прокату.

Калібрований прокат, який використовується для холодного висадження болтів, після всіх технологічних переробок не повинен належати до категорії матеріалів, які важко деформуються. До важко деформованого металу відносяться сталі, що володіють підвищеним опором деформації, що призводить до підвищення навантаження на інструмент [51]. В процесі деформування

гарячекатаного і каліброваного прокату відбуваються зміни структури різних рівнів, супроводжувані, зокрема, формуванням дефектності, яка на макрорівні проявляється в зниженні щільності, а на субмікрорівні - в збільшенні спотворень кристалічної ґратки.

Волочіння є основним видом деформації при підготовці прокату до об'ємного штампування [1]. Калібрований прокат отримує неоднорідне деформаційне зміцнення і наклеп при його перебізі в конічній матриці в процесі волочіння. В результаті холодної деформації міцність каліброваного прокату з ростом ступеня обтиску підвищуються (зміцнення і наклеп), а пластичні властивості зменшуються. При ступенях обтиску більше 30% прокат зміцнюється в процесі волочіння практично однаково (або рівномірно) по всьому поперечному перерізу протягнутого прутка, що показано в роботі [52] шляхом визначення твердості в меридіональній площині шліфів.

При призначенні невеликих обтиснень (від 5 до 15%) прокату зменшуються робота і потужність пластичної деформації, однак заготівлі болтів мають низьку згинальну жорсткість. Тому доцільно призначати ступеня обтиску прокату поблизу граничного значення, коли забезпечуються підвищені механічні характеристики каліброваного прокату і одержуваних з нього стрижневих деформуються заготівлі при їх високій згинальній жорсткості. Можливий ступінь обтиску прокату залежить від пластичних характеристик, які багато в чому визначаються його мікроструктурою.

Найкращі властивості досягаються при однорідній мілкодисперсній мікроструктурі з рівномірним розподілом цементиту в фериті [50]. У сталі з зернистим перлітом розміри глобулярних частинок цементиту не змінюються навіть після великих ступенів обтиску, і пластична деформація відбувається в основному за рахунок фериту [53].

Це, на думку авторів [54], не викликає розпаду цементиту і, отже, прояв дефектності у вигляді охрупчення і зміцнення, пов'язаної з холодною пластичною деформацією і переходом частини атомів вуглецю в атмосфері

на дислокаціях.

На думку авторів [55], відносне обтиснення під час волочіння повинно бути не менше 28-30%, а за деякими даними - не менше 35%. Автори [56] визначали ступінь обтиску при волочінні q (%) як відношення $100(d_{02} - d_{k2})/d_{02}$, де d_{02} , d_{k2} - початковий і кінцевий діаметр зразка. Дані автори [57] вивчили і побудували експериментальні криві залежності механічних властивостей від ступеня попередньої деформації при волочінні, які представлені на рис. 3.1.

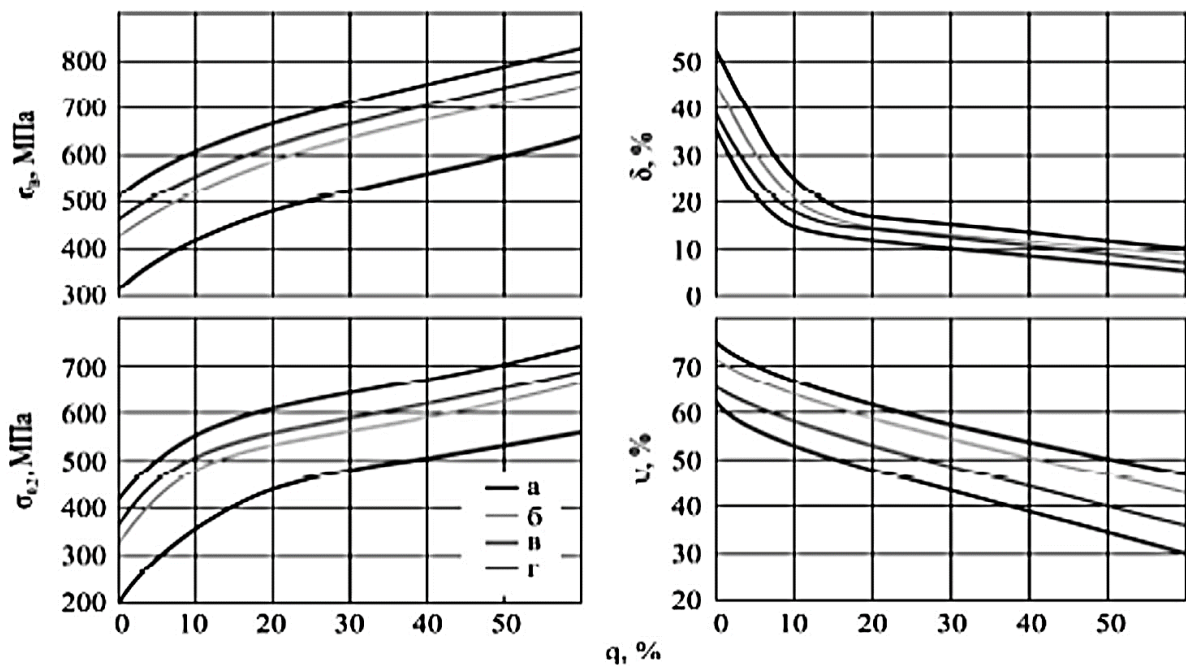


Рисунок 3.1 - Механічні властивості сталей при розтягуванні в залежності від ступеня обтиснення під час волочіння q : а - сталь 10 кп; б - сталь 30; в, г – сталі 40Х, 45[52]

На думку авторів [58], найкраще поєднання механічних характеристик (висока пластичність і незначний опір пластичної деформації) досягається при стисненні 5%. Зі збільшенням обтиснення до 10% спостерігаються інтенсивне зростання межі текучості і різке зниження відносного подовження. При стисненні 15% значно зростає межа міцності, а відносне подовження продовжує

зменшуватися. Подальше збільшення обтиску до 60% викликає безперервне зростання межі плинності і межі міцності, відносно видовження повільно знижується, а відносно звуження знаходиться на високому рівні (60-58%) до обтиску 25%, а після чого падає двома ступенями в інтервалах обтиску 25-35 % і 40-60%.

При цьому потрібно враховувати, що величина сумарної деформації (волочіння + всі переходи) при ХОШ на автоматах досягає 85%.

Автори [59] вважають, що для холодного висадження кріпильних виробів однаково небажано застосування твердого (більш НВ 290) і м'якого (менше НВ 160) каліброваного прокату. При виготовленні болтів з прокату високої твердості різко зростають питомі зусилля на інструмент, знижується його стійкість, з'являються тріщини на металі, погіршується заповнення порожнини матриці при холодному об'ємному штампуванні на автоматах. Під час висадки болтових виробів з «м'якого» прокату погіршується стійкість заготівлі довгомірного болта, деформування відбувається нерівномірно і метал швидко «налипає» на інструмент.

Аналіз літературних даних дозволяє рекомендувати наступні основні показники каліброваного прокату для подальшого виготовлення з нього метизів методом холодного штампування:

1. НВ від 170 до 290.
2. $\sigma_{0,2}/\sigma_b = 0,6 - 0,72$ - дане співвідношення залежить від хімічного складу.
3. $\Psi \geq 60\%$ - прокат дуже пластичний; $50\% < \Psi < 60\%$ - прокат досить пластичний, $\Psi < 50\%$ - прокат непридатний для виготовлення болтів методом холодного об'ємного штампування.

Ставлення $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ значною мірою залежить від хімічного складу, режимів термообробки і волочіння. Є думка авторів [60], що при відношенні межі плинності до межі міцності в прокаті, яке дорівнює 0,9, спостерігається найкраща величина такої важливої експлуатаційної характеристики болтового виробу,

як висока релаксаційна стійкість.

Величина відносного звуження прокату вважається основним показником при подальшому деформуванні. Найкращу пластичність при холодному об'ємному штампуванні має калібрований прокат з відносним звуженням 50-60%.

Залежність механічних властивостей заготовлі для болтів М8 і М6 підготовлених по дослідній технології наведені на рисунках 3.2 - 3.9.

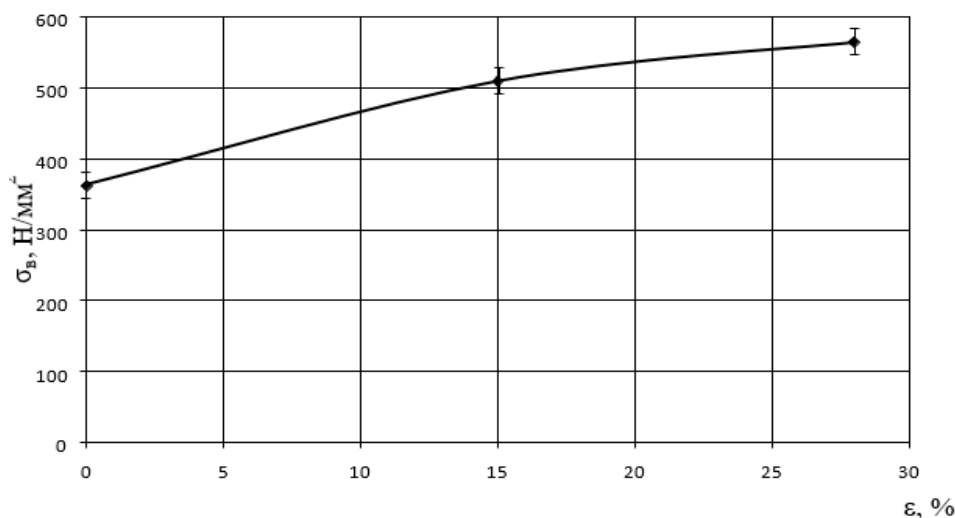


Рисунок 3.2 – Залежність межі міцності заготовлі зі сталі 20кп під болт М6 від ступеня деформації

Як видно з наведених малюнків формація заготовлі під болт М8 призводить до підвищення міцності на 62%, для заготовлі під болт М6 45%, при цьому заготовля під болти М6 відповідає всім критеріям для катанки з хорошою штампуемістю, котрі наведені вище. Слід зазначити що прокат для болтів М8 не відповідає критеріям катанки для штампування болтів по співвідношенню $\sigma_{0,2}/\sigma_v$, однак цей параметр не вплинув на якість отриманих болтів.

3.2 Визначення оптимальних параметрів циклічної деформації і термічної дії на заготовку для холодного об'ємного штампування

Визначення оптимальних параметрів технологічних операцій:

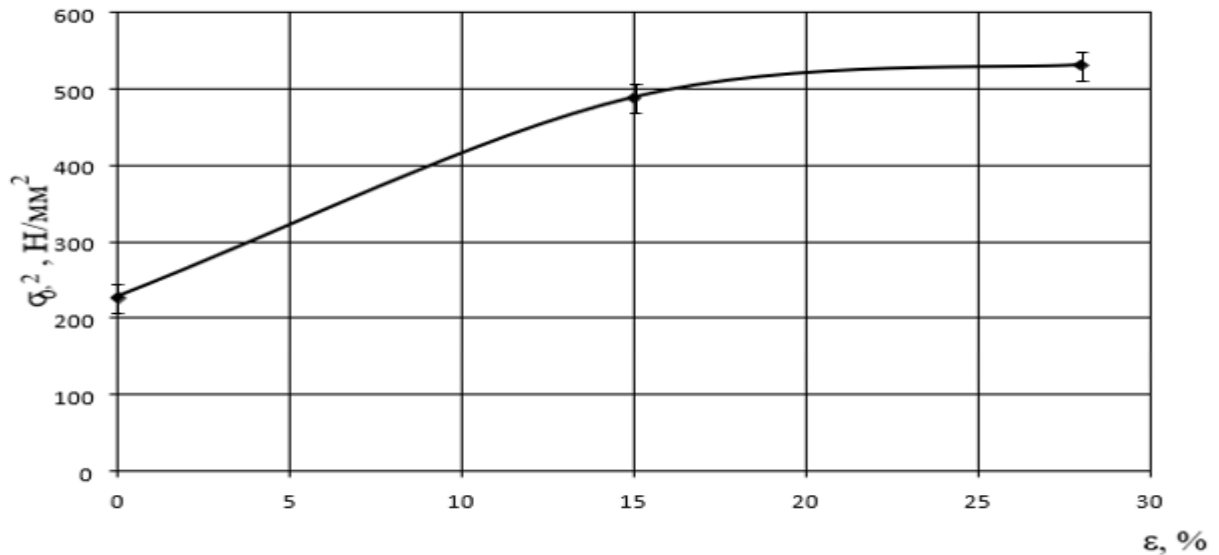


Рисунок 3.3 – Залежність межі плинності заготівлі зі сталі 20кп під болт М6 від ступеня деформації

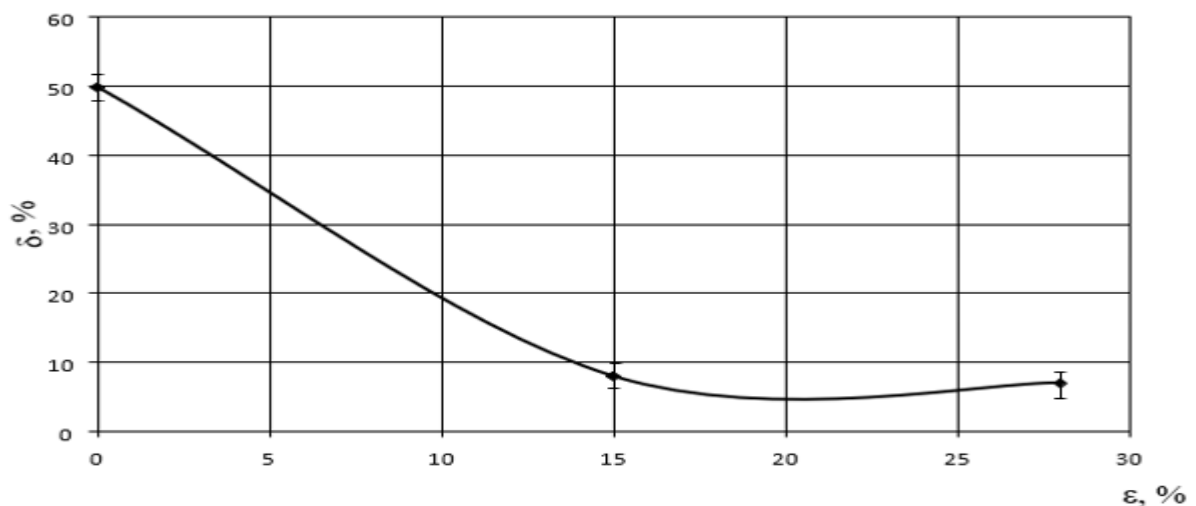


Рисунок 3.4 – Залежність відносного подовження заготівлі зі сталі 20кп під болт М6 від ступеня деформації

активної та циклічної деформації і термічної дії на заготівлю для холодного об'ємного штампування для виробництва високоміцних сталевих кріпильних виробів без фінішного термічного зміцнення проводили в умовах лабораторії механічних випробувань кафедри ТОМ НМетАУ і на виробничих потужностях ПАТ «Дніпрометиз».

Матеріалом дослідження слугувала катанка зі сталі 20кп, хімічний склад

наведено в таблиці 2.2.

Холоднодеформована заготівля $\varnothing 7,44$ мм (для болтів М8) була отримана в умовах кріпильного цеху ПАТ «Дніпрометиз».

Холоднодеформована заготівля була отримана з катанки $\varnothing 11,0$ мм, яка була піддана активної холодної деформації волочінням по режиму: катанка $\varnothing 11,0$ мм \rightarrow волочіння в монолітній волоці на $\varnothing 8,60$ мм \rightarrow волочіння в монолітній волоці на $\varnothing 7,44$ мм; сумарна ступінь деформації $\varepsilon \approx 53\%$.

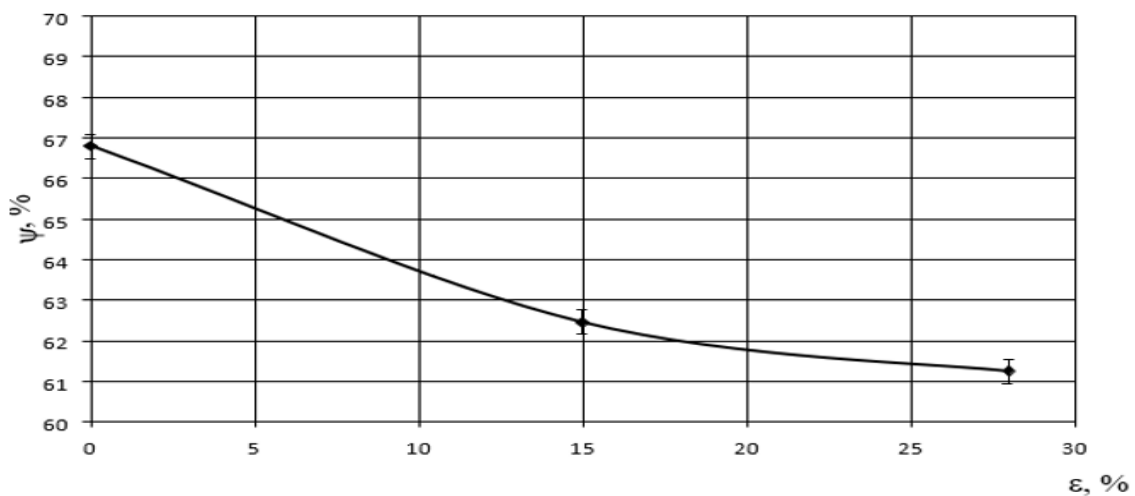


Рисунок 3.5 – Залежність відносного звуження заготівлі зі сталі 20кп під болт М6 від ступеня деформації

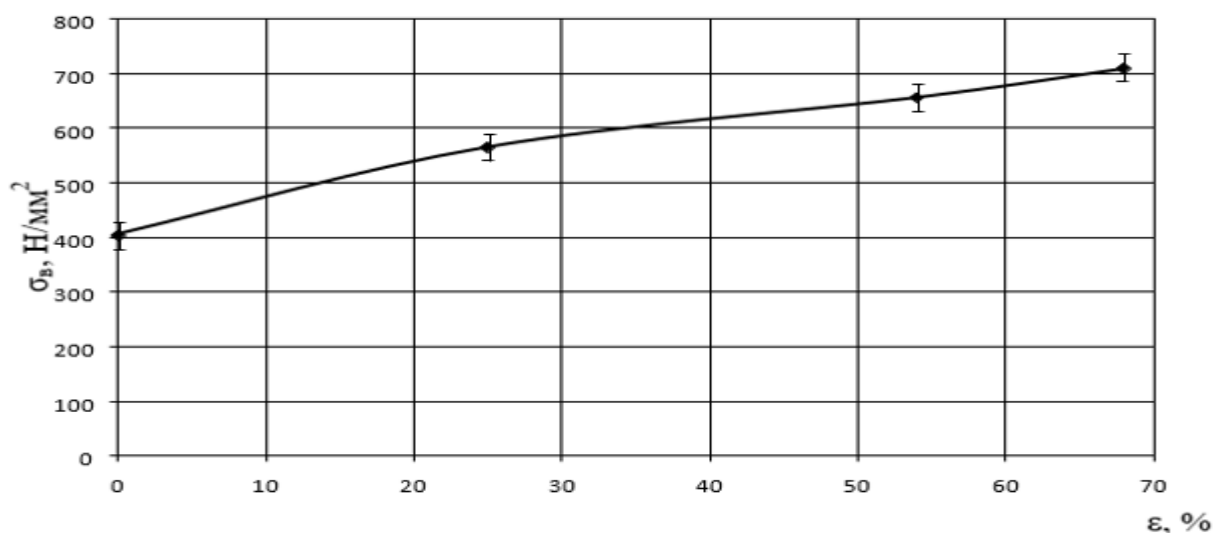


Рисунок 3.6 – Залежність межі міцності заготівлі зі сталі 20кп під болт М8 від ступеня деформації

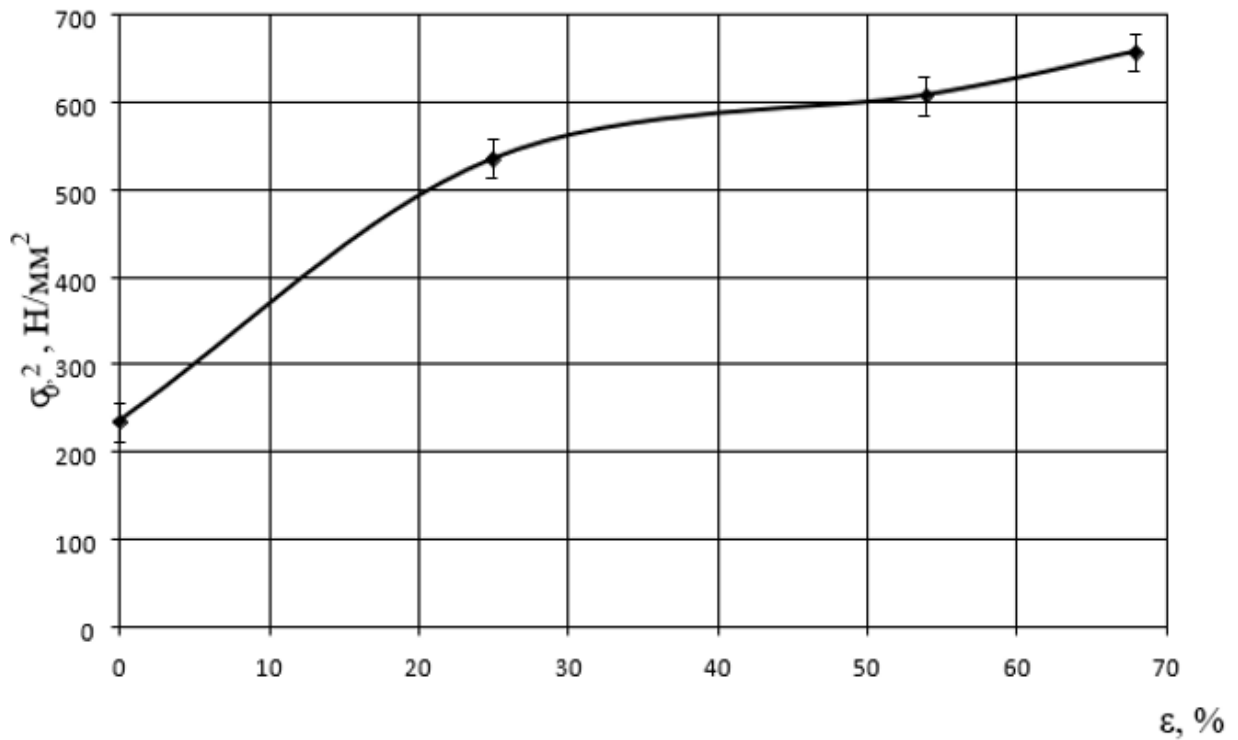


Рисунок 3.7 – Залежність межі плинності заготівлі зі сталі 20кп під болт М8 від ступеня деформації

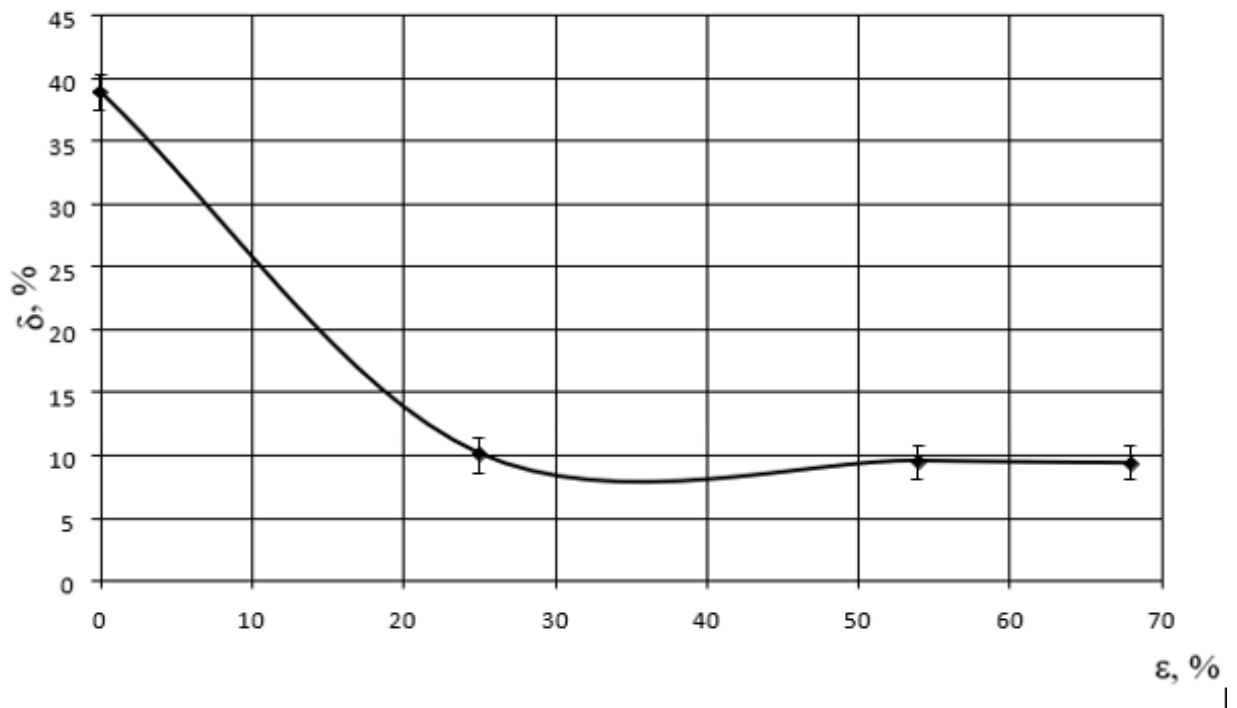


Рисунок 3.8 – Залежність відносного подовження заготівлі зі сталі 20кп під болт М8 від ступеня деформації

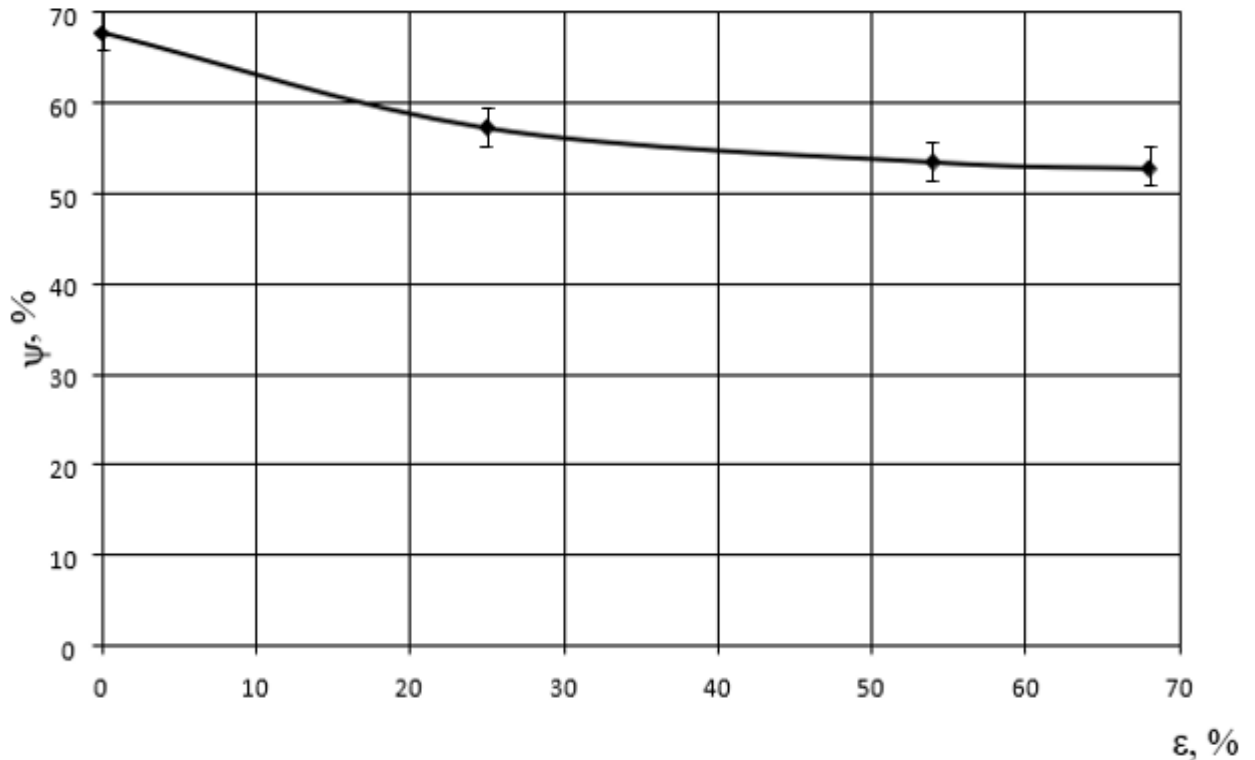


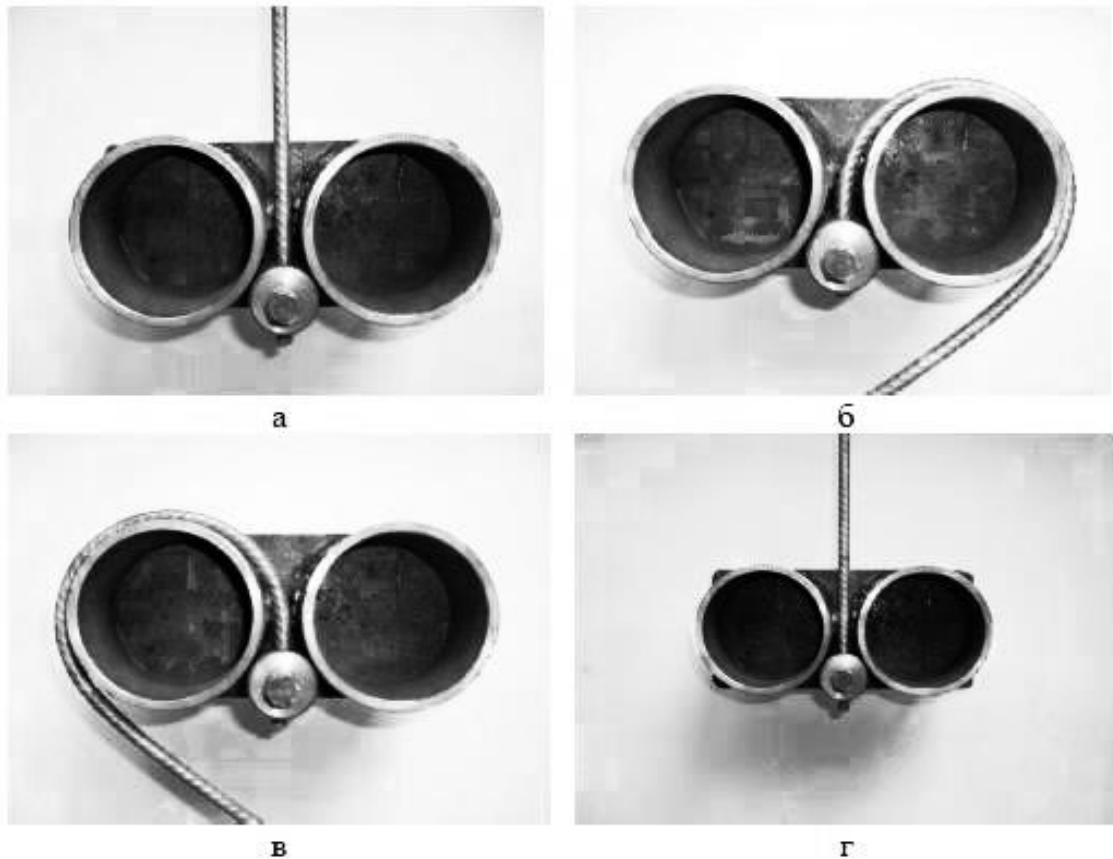
Рисунок 3.9–Залежність відносного звуження заготовки зі сталі 20кп під болт М8 від ступеня деформації

Після проведення деформаційного впливу шляхом активної деформації заготовки в лабораторії кафедри ТОМ НМетАУ піддавалася деформаційному впливу - циклічній деформації і термічній дії.

Циклічна деформація (ЦД) холоднодеформованої заготовки проводилася шляхом знакозмінного вигину навколо ролика $\varnothing 90$ мм (рис. 3.10), кількість циклів становила 1 і 2 циклів. Після проведення циклічної деформації заготовки піддавалася термічній дії (ТД) в лабораторній печі СНОЛ-2.3.1,8/10 по режимам нагрівання до 300 і 400 °С з витримкою при даних температурах 45 хв.

Визначення властивостей заготовки проводили відповідно до ДСТУ на універсальній випробувальній машині FP 100/1, зусилля навантаження - 40кН, швидкість навантаження 2 мм/хв. Параметри зразка: $l_0 = 200$ мм, $F_0 = 43,5$ мм². Механічні властивості холоднодеформованої заготовки наведені в таблиці 2.2.

Умовну сумарну ступінь деформації заготовки, що підлягала знакозмінній циклічній деформації згином ($\epsilon_{зг}$) вираховували по формулі:



а- вихідне положення, б - згин в напрямку за годинниковою стрілкою, в - згин в напрямку проти годинникової стрілки, г - повернення в початкове положення

Рисунок 3.10 - Пристрій та методика циклічного впливу (деформації) на зразок згином в один цикл

$$\varepsilon_{зг} = 2(d_{др}/d_p) \cdot N, \quad (3.1)$$

де $d_{др}$, d_p – діаметр дроту та згинаючих роликів відповідно, мм;

N – число циклів згину.

Механічні випробування зразків на розтягнення після використання циклічної деформації з метою визначення рівня міцності і пластичних властивостей проводили згідно з вимогами НД із записом діаграм розтягування.

Дослідження змін механічних властивостей в залежності від кількості

циклів знакозмінного згину показало, що при збільшенні кількості циклів (до 10...15) спостерігається зменшення характеристик міцності (σ_b , $\sigma_{0,2}$) та підвищення характеристики пластичності ($\delta, \%$). Встановлено, що вже при 3-5 циклах деформації відбувається зниження межі плинності на 90-100МПа, межі міцності на 40-50МПа та зростання відносного подовження до 7-8 %.

Найбільший зріст рівня пластичності (до 8,7%) спостерігається при кількості циклів 6-10 і цей рівень зберігається при зростанні кількості циклів до 15, а далі починає зменшуватись.

Після підготовки холоднодеформованої заготівлі в кріпильному цеху ПАТ «Дніпрометиз» були виготовлені болти М8х50х1,25 мм з повним різьбленням. Всі отримані болти випробовувалися як в початковому стані після холодного об'ємного штампування, так і після додаткового термічного впливу: старіння при 300 °С з витримкою 1 годину при даній температурі і відпуску при 400 °С з витримкою 1 годину при даній температурі.

Також для порівняння були відібрані і випробувані болти М8 вироблені за стандартною технологією ПАТ «Дніпрометиз» - болти класу міцності 5.8, які також випробовувалися як в початковому стані, так і після додаткового термічного впливу: старіння при 300 °С з витримкою 1 година при даній температурі і відпуску при 400 °С з витримкою 1 година при даній температурі. Для визначення рівня механічних властивостей, які необхідно досягти в пропонованій технології були випробувані болти М8х50х1,25 класу міцності 8.8 вироблених за стандартною технологією: холодне об'ємне штампування з подальшим термічним впливом: гартуванням і відпуском для досягнення необхідного рівня властивостей.

Механічні властивості болтів наведені в таблиці 3.1.

Як видно з результатів наведених в таблиці в технології виробництва високоміцного кріплення з низьковуглецевих нелегованих сталей зміцнених тільки холодної деформацією необхідно використовувати ступінь деформації при волочінні не менше 50%, сталь з вмістом вуглецю 0,25-0,3% і в якості

Таблиця 3.1 - Механічні властивості холоднодеформованої заготовки після активної деформації, циклічної деформації і термічного впливу

№ режиму	Обробка	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²	δ_p , %	ψ , %
1	Катанка \varnothing 11 мм	234,85	403,4	31	67,65
2	Заготовка \varnothing 7,4 мм	620,7	672	4,9	46,2
3	Заготовка \varnothing 7,4 мм + ЦД 2 цикла	472,6	589,3	9,8	50,3
4	Заготовка \varnothing 7,4 мм + ЦД 2 цикла + ТВ 300 °С (1 ч.)	534,6	622	6,25	52
5	Заготовка \varnothing 7,4 мм + ТВ 300 °С (1 ч.)	620	673	2	43
6	Заготовка \varnothing 7,4 мм + ЦД 2 цикла + ТВ 400 °С (1 ч.)	539	610	8,4	54
7	Заготовка \varnothing 7,4 мм + ТВ 400 °С (1 ч.)	604	665	5	43
8	Заготовка \varnothing 7,4 мм + ЦД 1 цикла	514	619	7,7	47

Обробки, що підвищує пластичність доцільно використовувати циклічну деформацію ультразвуком або віброобробку оскільки дані види обробки на відміну від знакозмінного вигину не змінюють геометрію виробу.

Як видно з результатів наведених в таблиці 3.1 в технології виробництва високоміцного кріплення з низьковуглецевих нелегованих сталей зміцнених тільки холодною деформацією необхідно використовувати ступінь деформації при волочінні не менше 50%, сталь з вмістом вуглецю 0,25-0,3% і в якості обробки, що підвищує пластичність застосовувати циклічну деформацію.

Таблиця 3.2 - Механічні властивості болтів М8х50х1,25

Тип зразка	H_c , А/см	$R_{0,2}$, КН	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	R_{max} , КН	σ_v , Н/мм ²	δ_p , %	$\delta_{обц}$, %	$V_{п.н.}$, кН/%	Клас міцн.
Болти класу міцності 5.8	7,82	16,6	453,5	18,38	502	2,27	12,72	0,59	5.8
Болти класу міцності 5.8 + ТВ 300°C, $\tau = 1$ час	6,8	16,89	461,5	18,89	516,2	5,26	14,85	0,63	5.8
Болти класу міцності 5.8 + ТВ 400°C, $\tau = 1$ час	6,67	16,8	458,9	18,43	503,6	6,33	16,27	0,56	5.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 3	10,23	17,75	484,9	22,51	615	5,05	11,54	0,54	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 3 + ТВ 300°C, $\tau = 1$ год після ХОШ	8,88	21,25	580,6	23,89	652,6	5,32	11,05	0,6	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 3 + ТВ 400°C, $\tau = 1$ год після ХОШ	7,87	21,01	574	23,12	631,7	6,69	12,97	0,6	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 4	10,73	18,77	512,8	23,8	650,1	5,2	11,49	0,67	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 4+ ТВ 300°C, $\tau = 1$ год після ХОШ	8,53	22,06	602,8	24,75	676,2	5,81	10,99	0,65	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 4 + ТВ 400°C, $\tau = 1$ час після ХОШ	8,18	21,97	600,3	24,3	663	6,34	11,41	0,64	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 5	10,02	18,19	497	22,85	624,2	4,87	10,1	0,6	6.8

Тип зразка	H_c , А/см	$R_{0,2}$, КН	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	R_{max} , КН	σ_B , Н/мм ²	δ_p , %	$\delta_{общ}$, %	$V_{п.н.}$, кН/%	Клас міцн.
Болти з катанки підготовленої за режимом 5 + ТВ 300°C, $\tau = 1$ год після ХОШ	8,26	21,64	591,1	24,2	661,3	6,78	11,43	0,68	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 5 + ТВ 400°C, $\tau = 1$ год після ХОШ	8,36	21,38	584	23,56	643,9	6,67	12,06	0,61	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 6	9,78	20,07	548,3	25,2	688,6	5,22	10,95	0,66	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 6 + ТВ 300°C, $\tau = 1$ год після ХОШ	9,07	23,21	634,1	25,84	706	5,85	10,81	0,72	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 6 + ТВ 400°C, $\tau = 1$ год після ХОШ	8,04	22,29	608,9	24,55	670,9	6,84	12,56	0,63	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 7	9,33	19,12	520,9	24	655,9	4,14	9,27	0,75	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 7 + ТВ 300°C, $\tau = 1$ год після ХОШ	9,11	23,22	634,5	25,2	687,6	4,8	9,24	0,7	6.8
Болти з катанки підготовленої за режимом 7 + ТВ 400°C, $\tau = 1$ год після ХОШ	7,91	21,4	584,7	23,6	645,9	6,31	12,23	0,6	6.8
Болти класу міцності 8.8	18,31	29,77	813,3	33,25	908,4	5,64	11,67	1,15	9.8

3.3 Дослідження мікроструктури зразків холоднодеформованої заготівлі кріплення після активної холодної деформації та додаткових обробок

Дослідження мікроструктури холоднодеформованої заготівлі в процесі активної холодної деформації волочінням та додаткових термічних та деформаційних впливів проводили на зразках, параметри обробки яких наведені в таблиці 3.3. Дослідження структури болтів, виготовлених за стандартною та експериментальною технологіями проводили на зразках, параметри обробки яких наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.3 – Параметри обробки досліджуваних зразків холоднодеформованої заготівлі

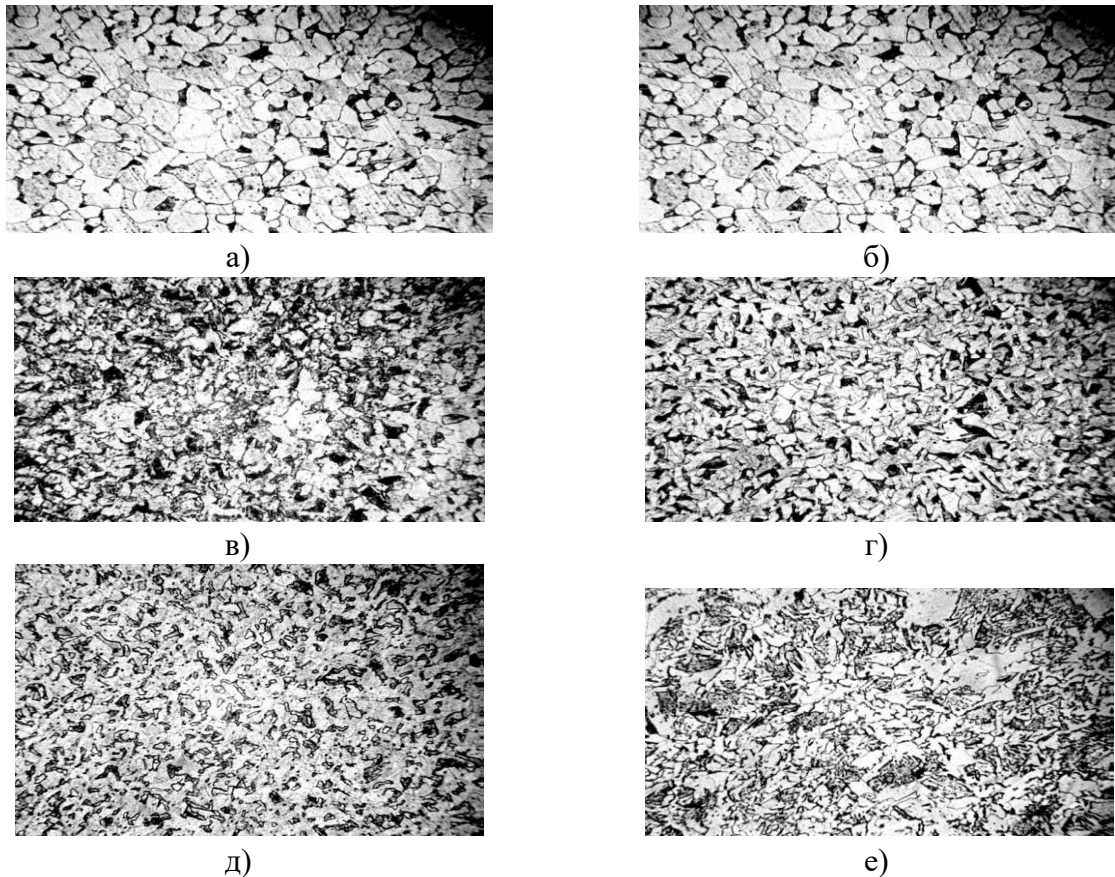
№ зр.	Найменування зразка	Розмір, мм	Обробка	Структурний стан
1	Катанка	11,0	г/к	початковий
2	Заготовка	9,5	волочіння	ХД
3	Заготовка	8,0	волочіння	ХД
4	Заготовка	7,4	волочіння	ХД
5	Заготовка	7,4	волочіння+400 ⁰ С	ХД+ТВ
6	Заготовка	7,4	волочіння+МЦО	ХД+ЦД
7	Заготовка	7,4	волочіння+МЦО+400 ⁰ С	ХД+ЦД+ТВ

Таблиця 3.4 – Параметри обробки досліджуваних зразків болтів, виготовлених за стандартною та експериментальною технологіям

№ зр.	Найменування зразка	Розмір, мм	Обробка	Структурний стан
Болти				
0	М8 кл.8.8		Стандартна технологія	
1	М8 кл.8.8		заг.7,4+400 ⁰ С	ХД+ТВ+ХОШ
2	М8		заг.7,4+МЦО	ХД+ЦД+ХОШ
3	М8		заг.7,4+МЦО+400 ⁰ С	ХД+ЦД+ТВ+ХОШ
Болти після додаткового старіння (ДС) (400 ⁰ С, 1 год.)				
0.1	М8		стандартна +ДС	
1.1	М8		дослідна	ХД+ТВ+ХОШ+ДС
2.1	М8		дослідна	ХД+ЦД+ХОШ+ДС
3.1	М8		дослідна	ХД+ЦД+ТВ+ХОШ+ДС

Мікроструктура досліджуваних зразків холоднодеформованої заготівлі після активної холодної деформації волочінням та додаткових впливів наведена на рисунку 3.11.

Мікроструктура досліджуваних болтів, вироблених за стандартною та дослідною технологіям наведені на рисунках 3.12 -3.17.



- а) катанка зі сталі 20кп до холодної деформації волочінням;
- б) холоднодеформована заготівля після волочіння на $\varnothing 9,5\text{мм}$;
- в) холоднодеформована заготівля після волочіння на $\varnothing 8,0\text{мм}$;
- г) холоднодеформована заготівля $\varnothing 7,4\text{мм}$ після додаткового термічного впливу; д) холоднодеформована заготівля $\varnothing 7,4\text{мм}$ після додаткової циклічної деформації; е) холоднодеформована заготівля $\varnothing 7,4\text{мм}$ після додаткової циклічної деформації та термічного впливу

Рисунок 3.11 - Мікроструктура заготівлі для виробництва високоміцних болтів, x 500

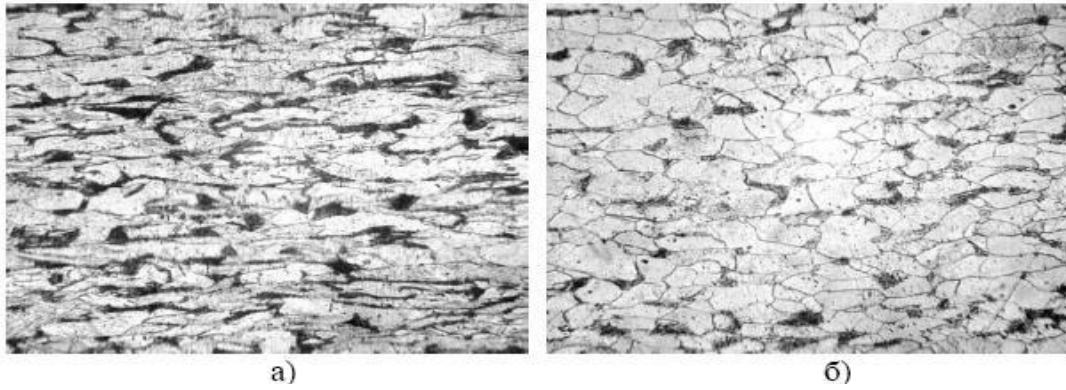


Рисунок 3.12 - Мікроструктура болта М8 кл.8.8 (зразок 0), виготовленого за стандартною технологією (поздовжній перетин зразка), x500:
а) структура в центрі зразка; б) структура на поверхні зразка;

3.4 Рентгеноструктурне дослідження впливу активної холодної деформації, циклічної деформації та термічних впливів на властивості холоднодеформованої заготівлі та кріпильних виробів

Дослідження проводилися на холоднодеформованій заготівлі із сталі 20кп та готових болтах виготовлених за стандартною та дослідною технологіям.

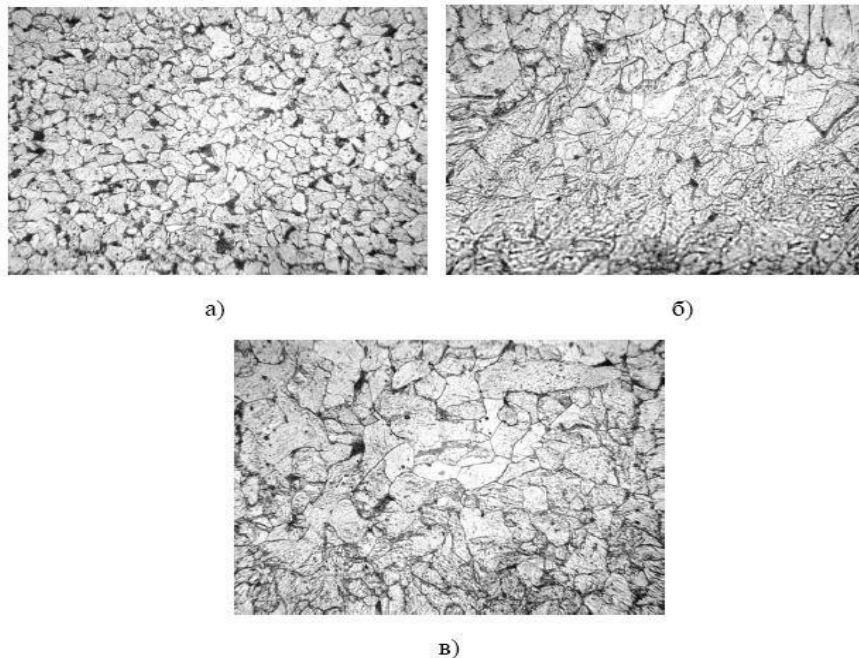
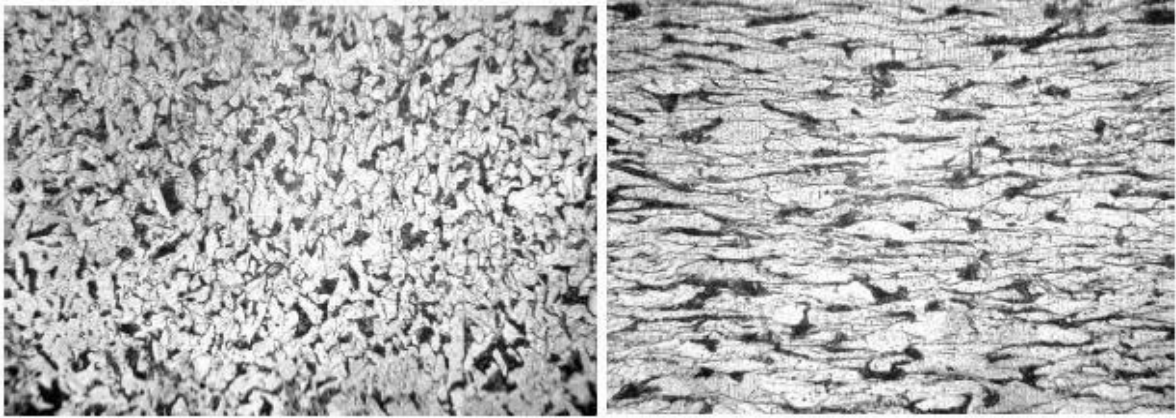


Рисунок 3.13 - Мікроструктура болта М8 кл.8.8 (зразок 0.1), виготовленого за стандартною технологією після додаткового старіння (поперечний перетин зразка), x500: а) структура в центрі зразка; б) структура на поверхні зразка; в) структура перехідної зони

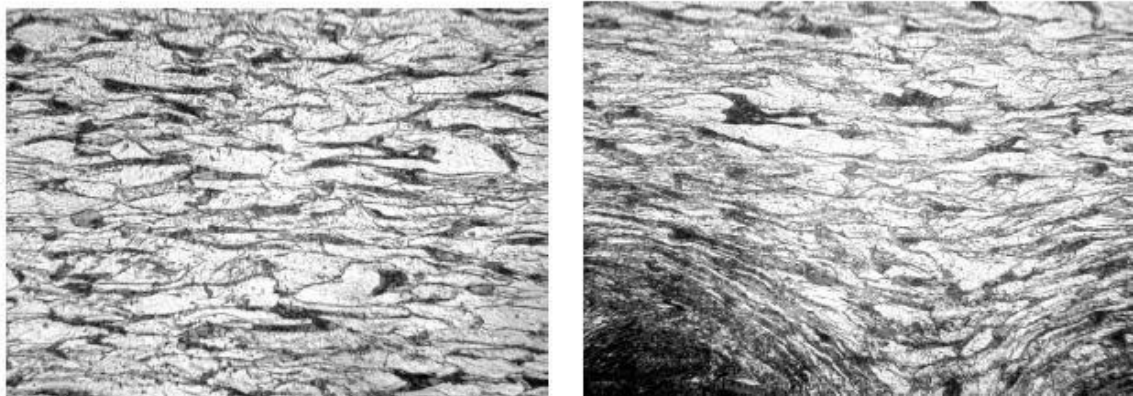


а)

б)

Рисунок 3.14 - Мікроструктура болта М8 кл.8.8 (зразок №1), виготовленого за експериментальною технологією (структурний стан ХД+ТВ+ХОШ), (подовжній перетин зразка), x500: а) структура в центрі зразка; б) структура на поверхні зразка

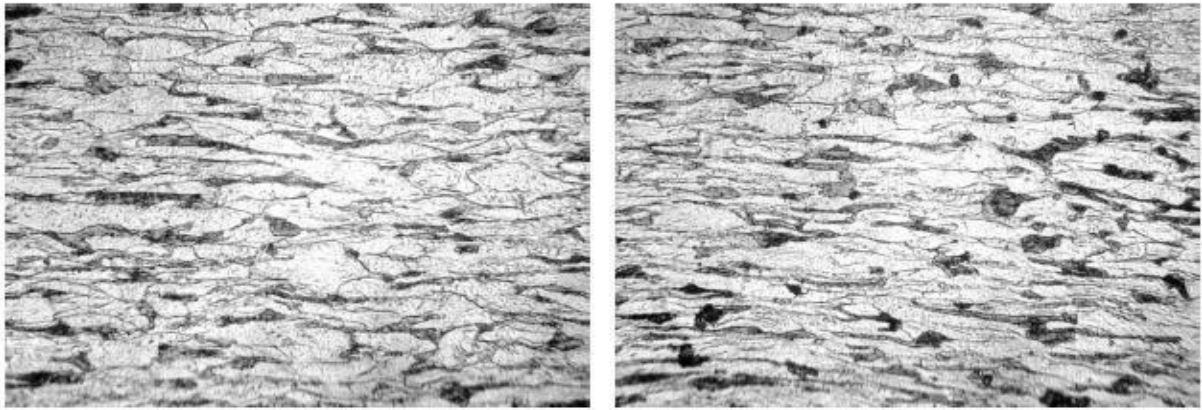
При пластичній деформації волочінням кристаліти витягуються і розгортаються в напрямку деформації, в результаті чого виникає так звана осьова або аксіальна текстура. Результати рентгеноструктурного аналізу заготовки наведені в таблиці 3.5.



а)

б)

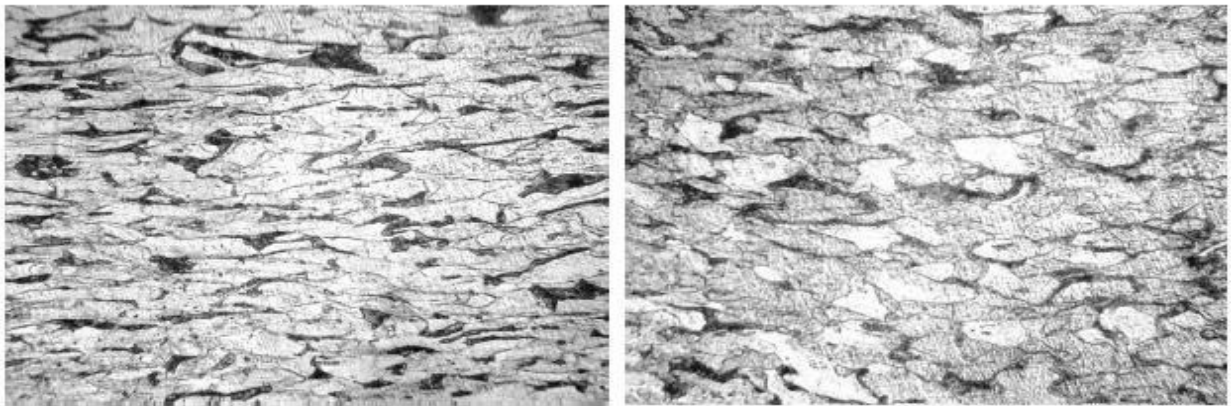
Рисунок 3.15 - Мікроструктура болта М8 кл.8.8 (зразок №1.1), виготовленого за експериментальною технологією після додаткового старіння (структурний стан ХД+ТВ+ХОШ+ТВ) (подовжній перетин зразка), x500: а) структура в центрі зразка; б) структура на поверхні зразка



а)

б)

Рисунок 3.16 - Мікроструктура болта М8 кл.8.8 (зразок №3), виготовленого за експериментальною технологією (структурний стан ХД+ЦД+ТВ+ХОШ) (подовжній перетин зразка), x500: а) структура в центрі зразка; б) структура на поверхні зразка



а)

б)

Рисунок 3.17 - Мікроструктура болта М8 кл.8.8 (зразок №3.1), виготовленого за експериментальною технологією після додаткового старіння (структурний стан ХД+ТВ+ХОШ+ТВ) (подовжній перетин зразка), x500: а) структура в центрі зразка; б) структура на поверхні зразка

В процесі волочіння заготовки з $\varnothing 11\text{мм}$ на діаметр $\varnothing 7,4\text{мм}$ відбувається зменшення параметра ґратки з одночасним підвищенням щільності дислокацій. Збільшення ОКР по кристалографічному Напрямку (110) свідчить про орієнтованість кристалітів вздовж (110), яке

збігається з напрямком волочіння (див. рис. 3.18, 3.19).

Таблиця 3.5 – Результати рентгеноструктурного аналізу холоднодеформованої заготовки

№ зр.	Тип зразка	a, нм	$\beta_{(110)}$	$\beta_{(220)}$	$L_{(110)}$, Å	$L_{(220)}$, Å	$\rho_{(110)}$, см ⁻²	M_s , $\approx 10^{-3}$, % Ступінь мікро напруг
1	Заготовка Ø11 мм	2,8241	0,222	0,534	1034	795	$7,5 \times 10^8$	1,46
2	Заготовка Ø9,5 мм	2,83	0,207	0,462	1109	973	$6,53 \times 10^9$	1,25
3	Заготовка Ø8 мм	2,81	0,116	0,479	1981	936	$2,05 \times 10^{10}$	1,95
4	Заготовка Ø7,4 мм + 400°C	2,80	0,118	0,254	1948	1471	$5,12 \times 10^{10}$	2,3
5	Заготовка Ø7,4 мм + МЦО	2,82	0,124	0,339	1852	1326	$2,34 \times 10^{10}$	1,6
6	Заготовка Ø7,4 мм + МЦО + 400°C	2,92	0,308	0,351	1109	1286	$6,53 \times 10^{10}$	-1,9

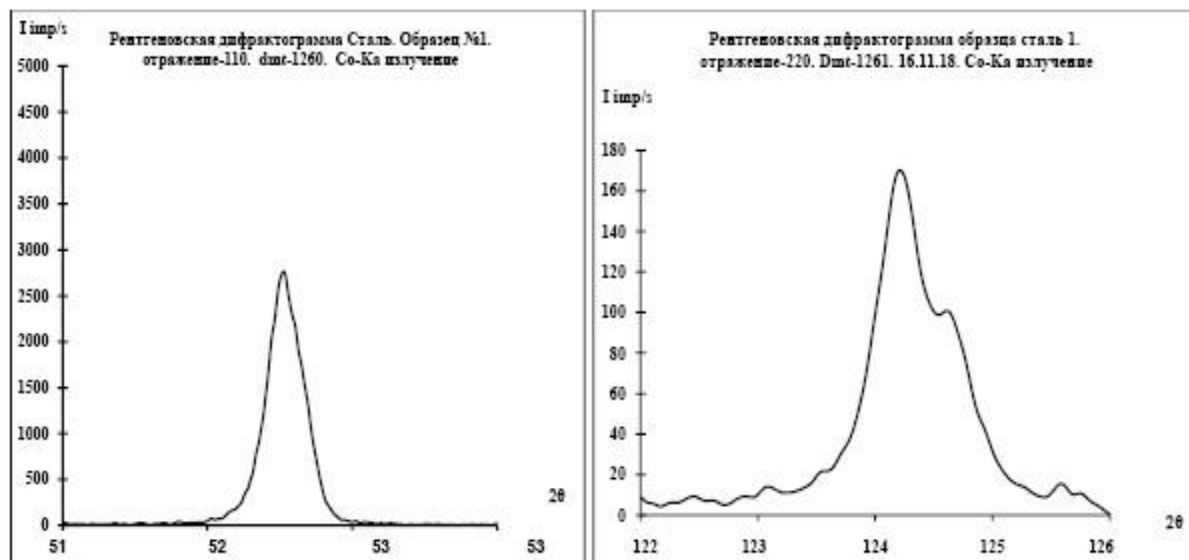


Рисунок 3.18 - Дифрактограми заготівлі (катанки Ø11,0мм)

Додатковий вплив на холоднодеформовану заготовку циклічної деформації призводить до збільшення параметра ґратки, зниження щільності дислокацій за рахунок їх об'єднання.

Також циклічна деформація призводить до зменшення розмірів кристаліти вздовж напрямку (110) і збільшення їх розміру у напрямку (220), що свідчить про формування більш рівноважної структури в порівнянні зі структурою після холодної деформації (див. рис. 3.20).

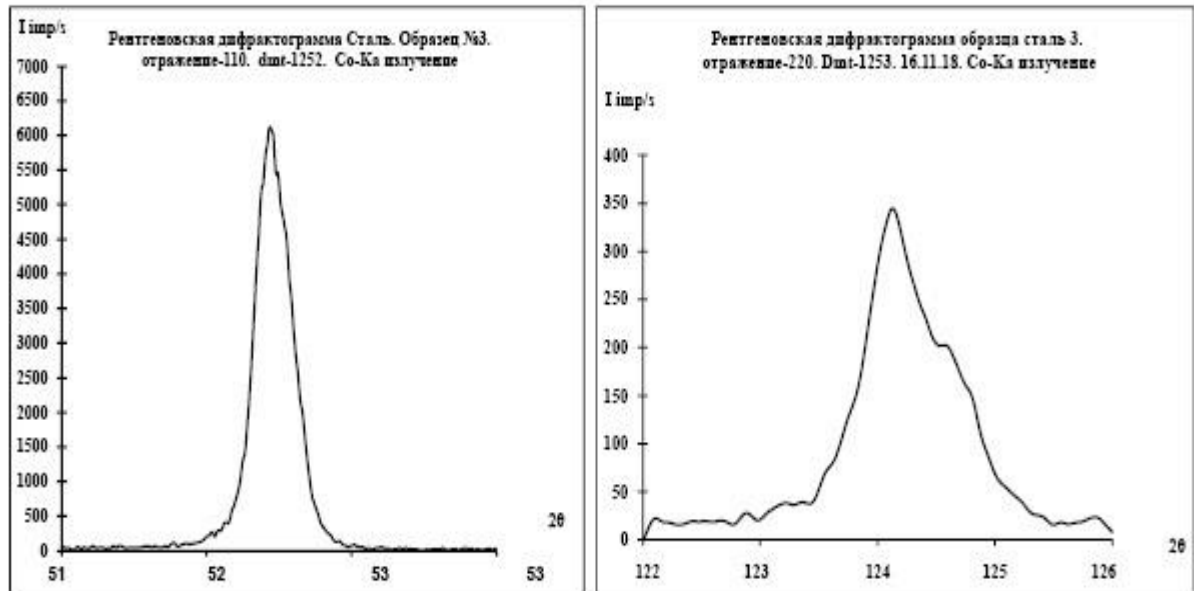


Рисунок 3.19 - Дифрактограми заготівлі Ø7,4мм після активної холодної деформації волочінням

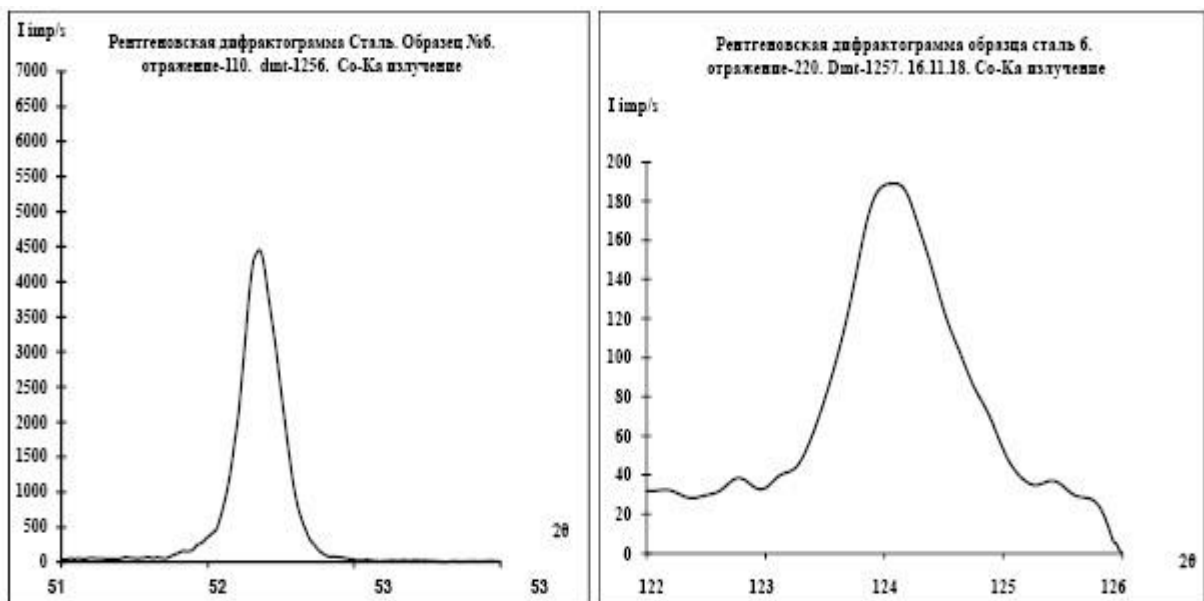


Рисунок 3.20 - Дифрактограми заготівлі Ø7,4мм після активної холодної деформації волочінням та ЦД

При додатковому термічному впливі при 400°C після циклічної деформації відбувається подальше збільшення параметра ґратки, а також збільшення розмірів кристалітів вздовж напрямку (220) (див. рис. 3.21).

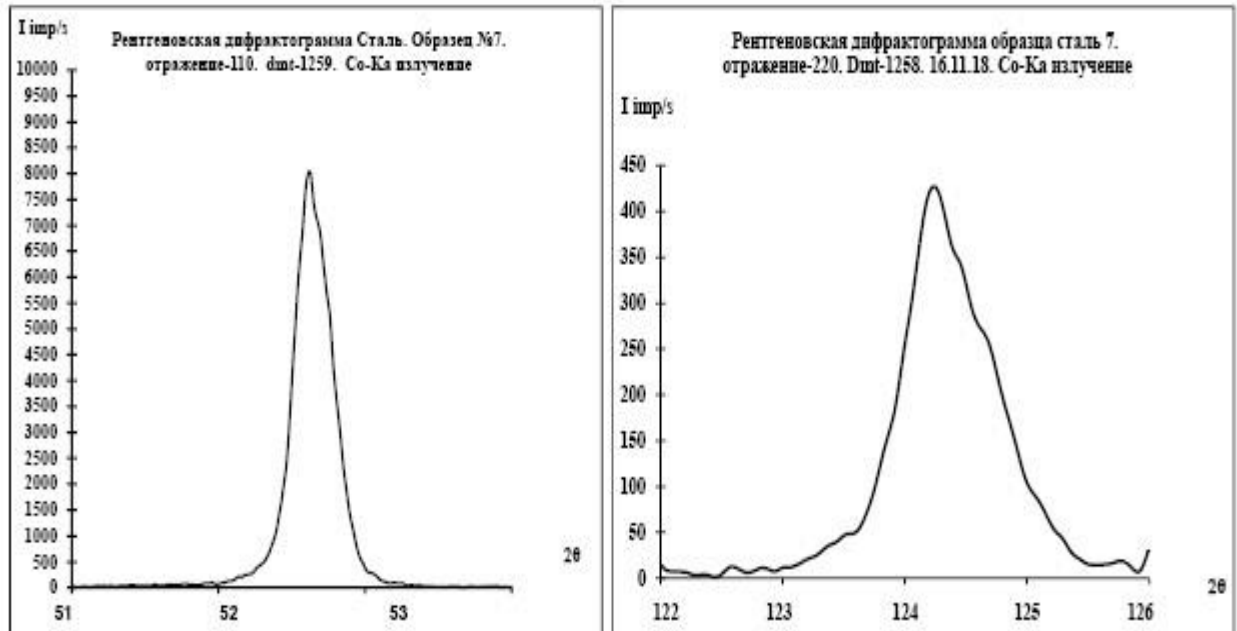


Рисунок 3.21 - Дифрактограми заготовк лі Ø7,4мм після активної холодної деформації волочінням + ЦД + ТВ

В результаті деформаційної обробки катанки при температурі нижче температури рекристалізації формується структура наклепаного металу, яка характеризується високою твердістю і значними залишковими напруженнями, які в залежності від режиму обробки можуть або збільшитися, або знизитися при релаксації.

При волочінні заготовлі з Ø11 мм на діаметр Ø7,4 мм в катанці виникають напруження розтягу, які зростають зі збільшенням ступеня деформації і при термообробці при 400 °С. Після циклічної деформації величина напружень знижується приблизно до вихідного рівня. Термічний вплив при 400°C після циклічної деформації призводить до зміни знаку мікронапружень за рахунок збільшення розміру кристалітів.

Дослідження високоміцних кріпильних виробів виготовлених за пропонованою технологією проводилося на болтах М8, вироблених на

ПрАТ «Дружківськийметизний завод». Досліджувалися болти виготовлені за стандартною (гартування +відпуск) і по дослідній технології із заготовки, отриманої за трьома технологіями: 1) волочіння з $\varnothing 11$ мм на діаметр $\varnothing 7,4$ мм з подальшим термічним впливом при $400\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2) волочіння з $\varnothing 11$ мм на діаметр $\varnothing 7,4$ мм з подальшою циклічною деформацією; 3) волочіння з $\varnothing 11$ мм на діаметр $\varnothing 7,4$ мм з подальшою циклічною деформацією і термічним впливом при $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зразки досліджувались в подовжньому і поперечному перерізі болта. Результати рентгеноструктурного аналізу наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати рентгеноструктурного аналізу високоміцних болтів, вироблених за стандартною і дослідною технологією

№ зр.	Тип зразка	a, нм	$\beta(110)$	$\beta(220)$	$L_{(110)}$, Å	$L_{(220)}$, Å	$\rho(110)$, см-2	M, $\cdot 10^{-3}$, % Ступінь мікрон.
1	M8 кл.8.8 Стандартна технологія	2,8456	0,141	0,39	1330	921	$1,21 \cdot 10^{11}$	7.05
2	M8 кл.8.8 Заг.7,4 + $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ + ХОШ (попер. зр.)	2,8446	0,146	0,526	1288	759	$1,42 \cdot 10^{11}$	7.4
2	M8 кл.8.8 Заг.7,4 + $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ + ХОШ (подовжній зр.)	2,8476	0,152	0,545	1234	626	$1,41 \cdot 10^{11}$	6.35
3	M8 Заг.7,4 + ЦД+ ХОШ (попер. зр.)	2,8431	0,144	0,456	1234	789	$1,4 \cdot 10^{11}$	7.92
	M8 Заг.7,4 + ЦД+ ХОШ (подовжній зр.)	2,8471	0,136	0,545	1379	660	$1,36 \cdot 10^{11}$	6.53
4	M8 Заг.7,4 + ЦД + $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ + ХОШ (попер. зр.)	2,847	0,147	0,504	1277	711	$1,41 \cdot 10^{11}$	6.7

прод. табл. 3.6

4	М8 Заг.7,4 + ЦД+ 400 °С+ ХОШ (подовжній зр.)	2,849	0,155	0,507	1209	708	1,47*10 ¹¹	5.83
5	Стандартна технологія+ 400 °С, 1год(попер. зр.)	2,8461	0,139	0,511	1353	826	1,17*10 ¹¹	6.87
	М8 кл.8.8Стандарт на технологія+ 400 °С, 1год(подовжній зр.)	2,8461	0,139	0,428	1351	840	1,17*10 ¹¹	6.87
6	М8 кл.8.8 Заг.7,4 + 400 °С + ХОШ + 400 °С, 1год (попер. зр.)	2,8481	0,147	0,409	1273	880	1,48*10 ¹¹	6.18
	М8 кл.8.8 Заг.7,4 + 400 °С ХОШ + 400 °С, 1год (подовжній зр.)	2,8476	0,136	0,436	1383	825	1,32*10 ¹¹	6.35
7	М8 Заг.7,4 + ЦД+ ХОШ + 400 °С, 1 час (попер. зр.)	2,8451	0,148	0,45	1270	800	1,33*10 ¹¹	7.22
	М8 Заг.7,4 + ЦД+ ХОШ + 400 °С, 1 час(подовжній зр.)	2,8452	0,154	0,45	1323	835	1,5*10 ¹¹	7.19
8	М8 Заг.7,4 + ЦД + 400 °С+ ХОШ + 400 °С, 1год (попер. зр.)	2,8547	0,216	0,758	866	473	1,44*10 ¹¹	3.87
	М8 Заг.7,4 + ЦД+ 400 °С+ ХОШ + 400 °С, 1год (подовжній зр.)	2,8436	0,141	0,442	1334	815	1,42*10 ¹¹	7.75

Болти, вироблені за стандартною технологією до і після додаткового деформаційного старіння не зазнають істотних змін тонкої структури. Спостерігається незначне зниження щільності дислокацій і розмірів ОКР по кристалографічних напрямках (220) і незначне збільшення по кристалографічних напрямках (110). Всі зазначені вище зміни лежать в межах похибки. Болти, вироблені за дослідною технологією мають менший в порівнянні з болтами, зробленими за стандартною технологією параметри ґратки і розмір кристалітів, а також велику щільність дислокацій, як в поздовжньому так і поперечному напрямках.

Додаткове деформаційне старіння болтів призводить до збільшення розмірів кристалітів і витягнутості зерен в поздовжньому напрямку і зменшує різницю між величиною мікронапружень і щільності дислокацій для болтів, виготовлених із заготовки ХД + ТВ і ХД + ЦД, тобто структура стає більш рівномірною. Додаткове деформаційне старіння болтів, вироблених з заготовки ХД + ЦД + ТВ призводить до різкого збільшення щільності дислокацій (більше, ніж в 1,3 рази) і зниження в 2 рази розмірів кристалітів в поперечному напрямку. Підвищення щільності дислокацій після циклічної деформації пов'язано з малим діаметром роликів та малою відстанню між ними в пристрої для нанесення циклічного впливу при виробництві заготовки для високоміцних болтів.

3.5 Дослідження втомної міцності болтів виготовлених за стандартною та дослідною технологіями

Втомне руйнування зазвичай відбувається в різьбових з'єднаннях через високу концентрацію напружень. Хоча в даний час для виготовлення елементів різьбових з'єднань застосовують різні високоміцні сталі з подальшим зміцненням термічною обробкою, втомного руйнування важко уникнути, тому що сплави високої міцності більш схильні до концентрації напружень. Статистичні дані показують, що понад 62% різьбових з'єднань руйнуються від втомних тріщин, в той час як 32% втомних тріщин виникають в різьбовій частині

кріплення [61]. Таким чином, поліпшення втомної міцності високоміцних кріпильних виробів є актуальною темою для досліджень в усьому світі.

Випробування на міцність від втоми болтів проводили на болтах M8x1,25x75 і M8x1,25x70 з неповним різьбленням, вироблених за стандартною і дослідною технологією (без фінішного термічного зміцнення).

Хімічний склад сталі досліджених болтів наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Хімічний склад сталі болтів M8

Розмір болтів, мм, технологія виготовлення	Склад елементів, мас.%,						Марка сталі
	C	Mn	Si	S	P	B	
M8x75 (стандартна)	0,35	0,52	0,18	0,012	0,013	-	35
M8x70 (дослідна)	0,18	0,36	< 0,01	0,013	0,010	-	20кп

Випробування проводилися на універсальній розривній машині EUS20 (з пульсатором), призначеній для статичних випробувань стандартних зразків металів на розтяг, стиск, вигин, малоциклову втому по переміщенню активного захоплення і деформації, релаксацію, повзучість і гістерезис при нормальній температурі. Умови випробування: нормальна температура, деформація розтягуванням, асиметрія циклу становила 0,63; частота циклічних напружень - 600 - 700 цикл./хв.; база випробувань - 1 000 000 циклів.

Мінімальне навантаження циклу (P_{\min}) встановлювалося рівним 12 кН, а максимальне навантаження циклу (P_{\max}) - 19 кН. Схема навантаження болтів при випробуваннях представлена на рисунку 3.22. Результати втомних випробувань болтів, вироблених за стандартною і дослідною технологіями наведені в таблицях 3.8 і 3.9 відповідно.

Руйнування основної частини болтів, вироблених за стандартною

технологією сталося по різьбі болтів та на збігї різьби, один зразок був зруйнований у місці переходу головки болта до стрижня. Руйнування усіх

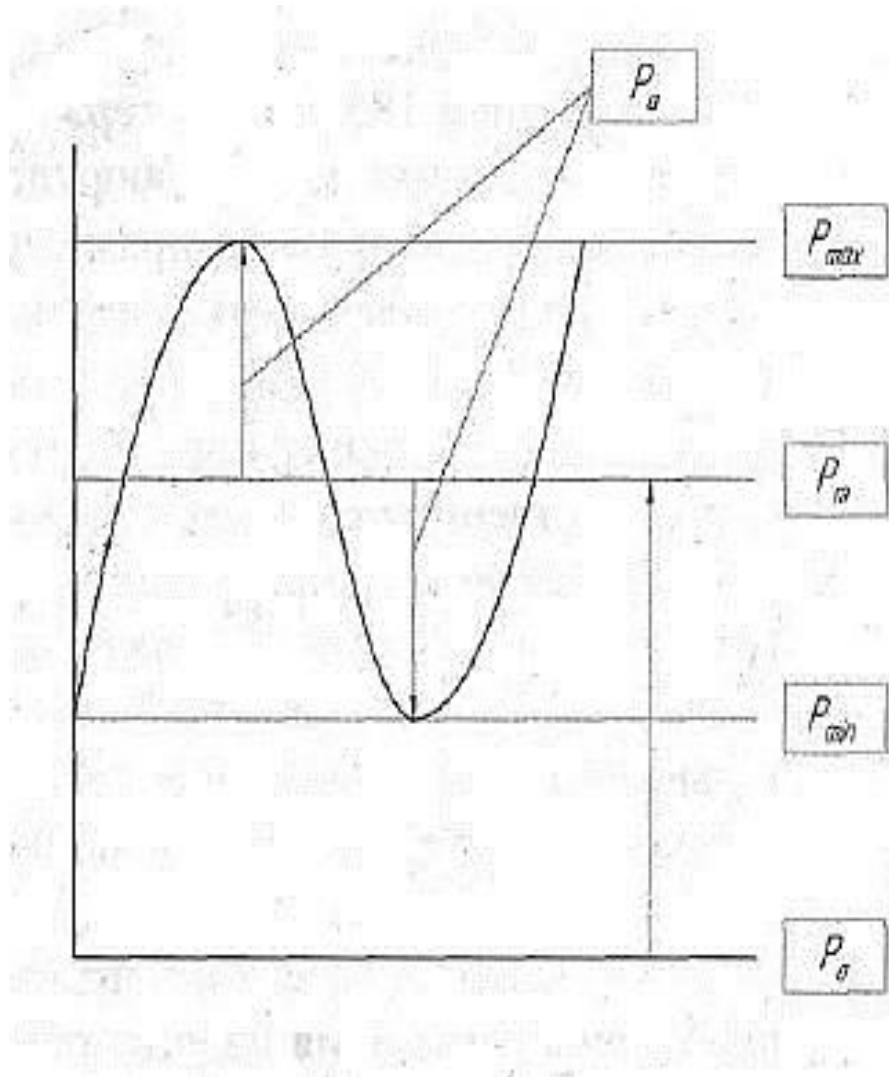


Рисунок 3.22 - Схема навантаження болтів при випробуванні на втому [61]

болтів, вироблених по дослідній технології сталося по різьбі.

Криві втоми болтів М8, вироблених за стандартною (сталь 35) і дослідною (сталь 20) технологією наведені на рисунку 3.23. Межа витривалості дослідних болтів склала 125 000 циклів, що на 48% більше, ніж межа витривалості болтів, вироблених за стандартною технологією.

Підвищення втомної міцності дослідних болтів пояснюється наступним чином. Нарізна різьба, зазвичай, містить мікротріщини і інші мікродефекти і має погану шорсткість поверхні, що призводить до зниження втоми. Накатка

різьблення, з іншого боку, призводить до пластичної деформації матеріалу і виникненню напружень в області западини різьблення. Даний процес, так само, підвищує пружну енергію в матеріалі. Крім того, викликане накаткою збільшення радіусу западини різьблення призводить до зниження концентрації

Таблиця 3.8 – Результати втомних випробувань болтів М8х1,25х75, вироблених за стандартною технологією

Номер зразка	R _{max} , кН	Максимальна напруга			Мінімальна напруга σ , Н/мм ²	Число циклів до руйнування, тис.(х1000)	Середнє число циклів, тис. (х1000)
		σ , Н/мм ²	Доля от $\sigma_{0,2}$ по ГОСТ	Доля від $\sigma_{0,2}$ по факт. величині			
1	19,0	527	~ 0,8	~ 0,7	327	69	84
2	19,0	527	~ 0,8	~ 0,7	327	148	
3	19,0	527	~ 0,8	~ 0,7	327	110	
4	19,0	527	~ 0,8	~ 0,7	327	35	
5	19,0	527	~ 0,8	~ 0,7	327	9	

Таблиця 3.9 – Результати втомних випробувань болтів М8х1,25х70, вироблених за новою технологією

№ зр.	R _{max} , кН	Максимальна напруга			Мінімальна напруга σ , Н/мм ²	Число циклів до руйнування, тис. (х1000)	Середнє число циклів, тис. (х1000)
		σ , Н/мм ²	Доля от $\sigma_{0,2}$ по ГОСТ	Доля від $\sigma_{0,2}$ по факт. величині			
1	19.0	527	~ 0,8	~ 0,8	328	128	125
2	19,0	527	~ 0,8	~ 0,8	328	72	
3	19,0	527	~ 0,8	~ 0,8	328	126	
4	19,0	527	~ 0,8	~ 0,8	328	128	
5	19,0	527	~ 0,8	~ 0,8	328	172	

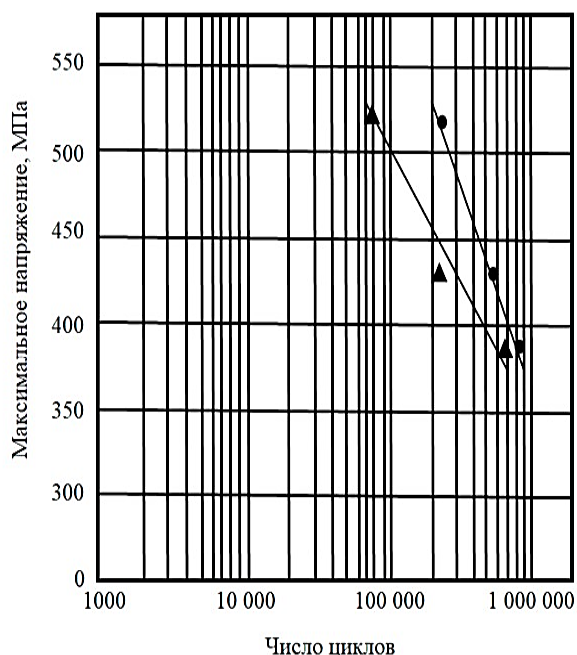


Рисунок 3.23 - Криві втоми болтів М8, вироблених за стандартною (▲) (сталь 35) і дослідною (●) (сталь 20) технологією

напружень. Також варто відзначити, що втомна міцність дослідних болтів підвищується внаслідок утворення особливої дислокаційної структури, отриманої шляхом холодної деформації з великим ступенем і подальшої циклічної обробки. Додатковий термічний вплив (старіння) холоднодеформованих болтів, виготовлених за дослідною технологією, дозволяє отримати структуру (див. рисунок 3.24), яка підвищує втомну міцність і яка дозволяє стримувати поширення втомних тріщин. Зазначена вище обробка дозволяє отримати на досвідчених болтах більш дрібну комірчасту структуру (рис. 3.24) в порівняння з болтами виробленими за стандартною технологією (рис. 3.25), а також підвищити щільність дислокацій, що в свою чергу підвищує пружну енергію, яка дозволяє стримувати поширення втомних тріщин.

Термічна обробка після АТ + ЦД, забезпечує за рахунок підвищення концентрації вакансій «геометричну» стабілізацію кордонів дислокаційних фрагментів, зниження об'ємного градієнта пружної енергії і деяке зміцнення, незважаючи на нагрів, за рахунок закріплення дислокацій атомами вуглецю при

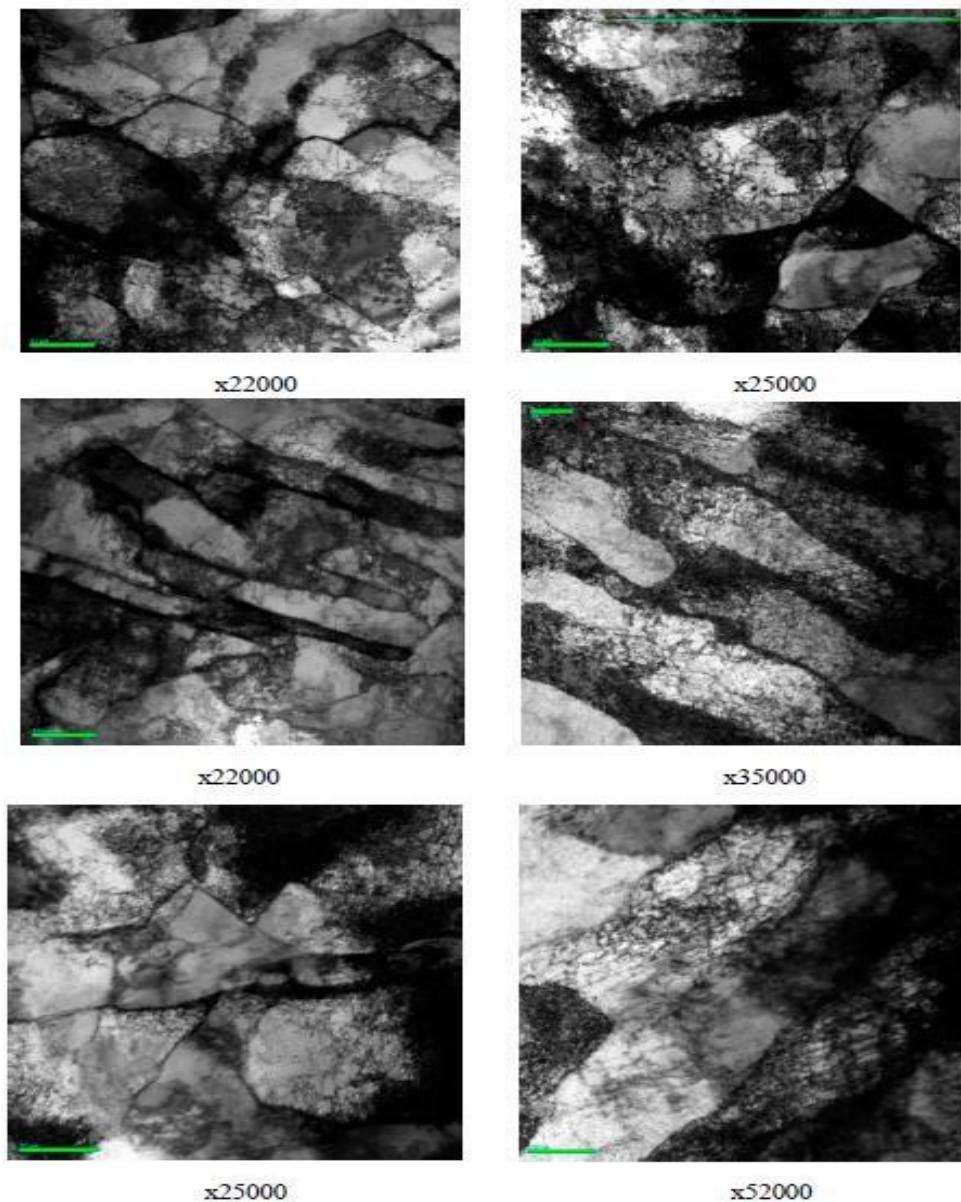


Рисунок 3.24 - Дислокаційна структура болтів, вироблених за дослідною технологією

високотемпературному деформаційному старінні ентропійного типу (джерело - цементит). В'язкість руйнування матеріалу болта підвищується завдяки сприятливому малюнку зерна, що отримується при накатці різьблення, де зерна витягнуті паралельно основним траєкторіям напружень і по нормалі до шляху поширення потенційної тріщини. Таким чином, тріщини можуть відхилитися від їх нормальної площини і напрямків зростання на кордонах зерен. Поєднання цих трьох чинників призводить до збільшення втомної міцності кріпильних виробів, вироблених холодної деформацією, без подальшого термічного зміцнення.

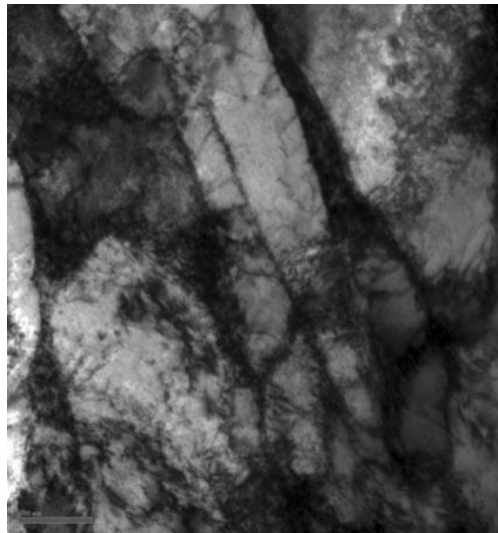


Рисунок 3.25 - Дислокаційна структура болтів, вироблених за стандартною технологією, x52000

3.6 Технологія стабілізуючої обробки холоднодеформованих кріпильних виробів

Холоднодеформовані болти, як правило, не містять легуючих елементів, які ефективно зменшують інтенсивність деформаційного старіння, тому процеси природного і штучного деформаційного старіння можуть знижувати опір в'язкому і крихкому руйнуванню.

Сталеві різьбові кріпильні елементи - гвинти, болти і шпильки класів міцності 4.8 - 6.8 [5], масово застосовують в машинобудуванні, будівництві та інших галузях і найчастіше виготовляють холодним об'ємним штампуванням (ХОШ). Дана операція, що пов'язана з холодною деформацією, підвищує міцність і знижує пластичні характеристики сталі. Ці кріплення (далі будемо розглядати тільки болти класу 5.8) не підлягають фінішним термічним обробкам, тому їх механічним властивостям (міцності і пластичності) притаманні зміни в часі (деформаційне старіння холоднодеформованої сталі). Рівень міцності і пластичних властивостей болтів класу міцності 5.8 [63] і характер зміни властивостей в процесі старіння як при вилежуванні на складі, так і при експлуатації, залежать від багатьох чинників, але в основному від хімічного

складу прокату, ступеню деформації та структурного стану. Технологічним регламентом [64] передбачається, що для подальшого застосування цих болтів при монтажі металоконструкцій передує підготовча операція розконсервації (видалення заводського технологічного мастила) кип'ятінням у воді (100°C) від 10 до 15 хв., яка може привести до охрупчення і додаткового зниження пластичності (за рахунок ефекту деформаційного старіння). Стандартом [5] нормуються механічні властивості болтів класу міцності 5.8, які контролює виробник і вносить в сертифікат якості. Однак, в ньому не прописаний механізм контролю механічних властивостей з урахуванням старіння, тому болти після виготовлення і доставки споживачеві, при підготовці до застосування і в процесі експлуатації можуть мати різні характеристики міцності і пластичності. Дана обставина змушує враховувати схильність сталевих виробів до деформаційного старіння і можливі його наслідки.

Під схильністю сталевих виробів до деформаційного старіння (ДС) розуміють:

а) абсолютна або відносна зміна (Δ) відповідних механічних характеристик: опору деформації (σ), пластичності (δ), опору руйнуванню як крихкому, так і в'язкому в порівнянні з деформованим (без старіння) станом;

б) збереження або не збереження в деформаційно-зістареному стані абсолютних значень зазначених механічних властивостей, не нижче передбачених діючими стандартами на даний вид металопродукції.

Згідно з позицією а): чим більше Δ , тим вище схильність даного об'єкта до ДС, тим вище нестабільність його властивостей в часі, в тому числі часу експлуатації сталевих виробів. Зазвичай за характеристиками опору деформації $\Delta > 0$, а по іншим $\Delta < 0$. Як правило, встановлюється гранично припустима зміна $|\Delta|$, що визначає стабільну механічну поведінку сталевого виробу або напівфабрикату під навантаженням. При цьому для сталевих виробів ця зміна встановлюється по зміні опору крихкому руйнуванню і зміні опору в'язкому руйнуванню, а для сталевих напівфабрикатів (наприклад, для холоднокатаного листа або круглих заготовок для холодного штампування) - за всіма трьома

групами механічних властивостей, або обирається провідна характеристика, яка визначає технологічну деформуємість даного сталевго напівфабрикату. Для сталевих виробів $\Delta_{\text{дод}}$ пов'язують з часом його досягнення в процесі ДС - $\tau_{\text{ДС}}$ і з заданим гарантованим часом експлуатації τ_e : $\tau_{\text{ДС}}^{\Delta_{\text{дод}}} \geq \tau_e$, де $\tau_{\text{ДС}}^{\Delta_{\text{дод}}}$ - граничний час старіння, при якому відповідні властивості виробу або напівфабрикату зберігаються на необхідному рівні. В іншому випадку потрібна або заміна сталі, або скорочення гарантованого терміну експлуатації. Для сталевих напівфабрикатів ситуація подібна, але замість τ_e порівнюється час вилежування їх до технологічної деформації τ_v : $\tau_{\text{ДС}}^{\Delta_{\text{дод}}} \geq \tau_v$.

Однак для сталевих напівфабрикатів є більші можливості дотримання придатності сталі для технологічної деформації без її (сталі) заміни: збільшенням $\tau_{\text{ДС}}$ за рахунок зниження температури зберігання напівфабрикатів або скорочення τ_v (поліпшення виробничої логістики).

Згідно з позицією б): схильність до ДС вважається допустимою, якщо ДС за спеціальним режимом після змодельованої холодної деформації зразка даної сталі (зазвичай до 10% при розтягуванні або стисканні) або після технологічної деформації, яка формує сталевий напівфабрикат або виріб, зберігає необхідний рівень технологічної пластичності або опору руйнуванню.

Вважається, що відмічені рівні збереження властивостей в ДС-стані отримані на основі великої статистики практики технологічної деформації зі сталевими напівфабрикатами або експлуатації сталевих виробів, а використовувані режими ДС в максимально можливій мірі знижують технологічну пластичність і опір руйнуванню. В останньому доводиться засумніватися, так як експериментально показано, що 10% -ва деформація зразків за різними схемами при постійній температурі і тривалості ДС дає суттєву різницю в зниженні опору крихкому і в'язкому руйнуванню [64, 65], а при постійній схемі і ступені деформації мінімальний рівень опору руйнуванню відповідає різним температурам ДС в залежності від вихідного (перед деформацією) структурного стану сталі [66]. Тому найбільш близьких до

дійсних результатів схильності до ДС слід очікувати в разі використання в якості об'єктів випробування натурних виробів або їх представницьких частин, наприклад кріпильних виробів, зміцнених холодною деформацією в виробничих умовах. При цьому перша складова частина режиму ДС - холодна деформація - повністю відповідає реальній в даних сталевих виробках, а режим власне старіння - температура і тривалість - підлягає варіюванню для встановлення параметрів найбільшого як негативного, так і, можливо, позитивного впливу ДС на властивості сталевих виробів.

Відзначимо, що методики визначення схильності до ДС [67-69] визначають зазвичай схильність даної сталі до ДС, але не сталевих виробів тієї чи іншої геометрії з даної сталі. Так, наприклад, схильність до ДС (за значенням КСУ, КСВ в ДС-стані) товстолистого прокату товщиною від 50 до 100 мм і вище визначають на стандартних зразках максимальної товщини 10 мм. Але ж давно вже встановлено, що зі збільшенням товщини значення КСУ (КСВ) падають, а температура холодноломкості зростає. При визначенні ударної в'язкості товстого листа падаючим вантаженням товщини зразків відповідають товщині листа, але цього немає в методиці визначення схильності до ДС.

Встановлені в стандартах режими ДС як за ступенями деформації, так і по температурі і тривалості подальшого старіння стандартизовані (як вже зазначалося) давно і певною мірою довільно, без урахування не тільки конкретних умов ДС для сталевих напівфабрикатів і виробів, а й структурного стану сталевих виробів. Наприклад, для прокату, використовуваного в конструкціях, в тому числі будівельних, стандартизований такий режим ДС, як 10% -ва деформація (розтягуванням або стисненням) + 0,5 - 1-год. старіння при 250 ° С, коли вироби застосовували, як правило, в гарячекатаному стані. Але значний і все більш зростаючий обсяг арматури, товстого листа, труб, фасонних профілів використовується в термічно зміцненому стані. Значно розширена і номенклатура марок сталі. Експлуатаційні навантаження сталевих виробів стали більш інтенсивними і різноманітними, що також вимагає відповідного обліку в методиках визначення схильності до ДС. В усіх методиках розгляду схильності

до ДС визначаються відповідні властивості тільки при ДС в розвантаженому стані, тоді як, якщо цього досить для сталевих напівфабрикатів, то для сталевих виробів необхідно визначення властивостей при ДС під навантаженням, яке забезпечує рівень напружень, відповідний експлуатаційним. Особливо слід виділити клас сталевих виробів, що виготовляються холодною деформацією і експлуатуються в холоднодеформованому структурному стані - арматура, кріплення та ін. В цьому випадку підлягають обліку: а - ДС сталевих напівфабрикатів, використовуваних як заготовки для виробництва сталевих виробів, після холодної деформації при калібруванні і виправлення, до технологічної деформації; б) - ДС сталевих виробів після виготовлення і до експлуатації; в) - ДС в процесі експлуатації під монтажними та експлуатаційними навантаженнями.

Методики визначення схильності до ДС розглянутих сталевих виробів відрізняються тим, що, по-перше, холоднодеформований структурний стан цих об'єктів створюється реальними деформаційними впливами в технологічному процесі їх виготовлення, а моделювання вимагають тільки навантаження на етапі в); по-друге, забезпечується відповідність випробовуваних об'єктів реальних об'єктів по геометрії. Таким чином, методика визначення схильності до ДС сталевих виробів розглянутого класу може бути максимально наближена до фактичної зміни властивостей цих сталевих виробів в результаті ДС. Адекватна методика визначення схильності до ДС виробів із сталей різних марок підлягає використанню не тільки при фіксації схильності до ДС і визначенні придатності (непридатності) даного сталевих виробів і сталі, з якої вона виготовлена, з розглядаємії властивості (ступеня стабільності властивостей), а й при розробці способів зменшення статичного деформаційного старіння (СДС) сталевих виробів і напівфабрикатів.

Дослідження проводилося на болтах М12х1,75х70 мм класу міцності 5.8 вироблені на ПАТ «Дніпрометиз», матеріал сталь 20кп.

Експеримент проводився в такий спосіб:

Була відібрана партія болтів 60 шт. в день їх виготовлення. З цієї партії в

день виготовлення були випробувані болти в початковому стані в кількості 3шт. Також в день виготовлення 5 партій болтів по 3 шт. були термічно оброблені по режиму $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 60\text{ хв}$, одна партія в день виготовлення після термічної обробки була також піддана деформаційному старінню при температурі $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ з витримкою 60 хв.

Випробування проводилися в день виготовлення, через три дні виготовлення, через сім днів після виготовлення і через місяць після виготовлення на випробувальній машині FP-100/1, шкала 100кН, швидкість 1,02 мм/хв із записом повних діаграм деформації.

Результати дослідження наведені на рис. 3.26 - 3.29.

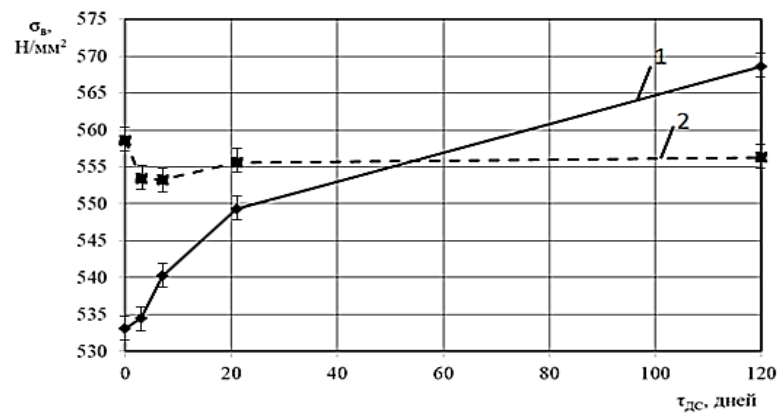


Рисунок 3.26 – Залежність межі міцності в залежності від днів старіння болтів класу міцності 5.8 в початковому стані (1) і після ТВ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2)

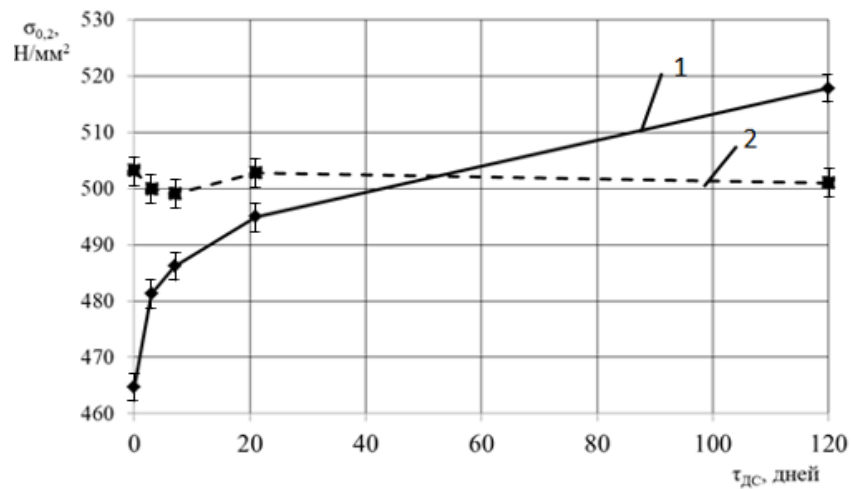


Рисунок 3.27 – Залежність межі текучості в залежності від днів старіння болтів класу міцності 5.8 в початковому стані (1) і після ТВ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2)

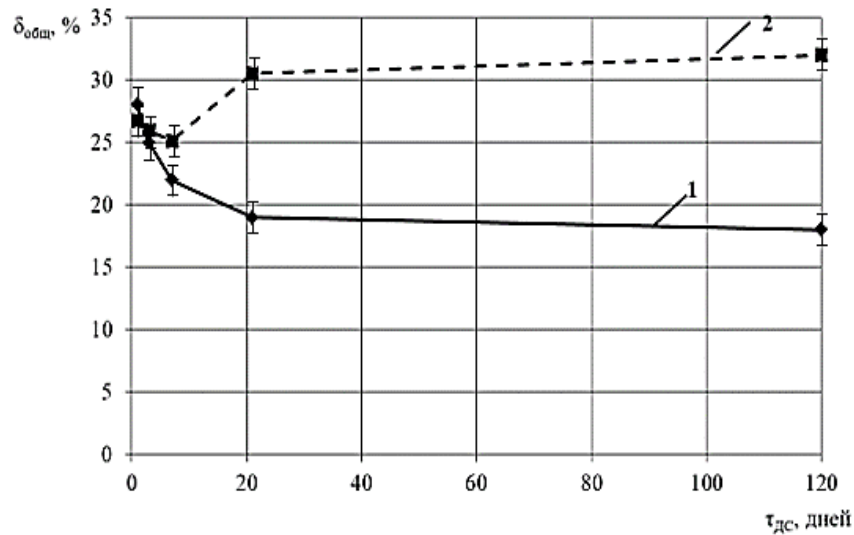


Рисунок 3.28 – Залежність загального відносного подовження в залежності від днів старіння болтів класу міцності 5.8 в початковому стані (1) і після ТВ 400 ° C (2)

Дані експериментів показують, що низькотемпературне деформаційне старіння призводить до зменшення $\delta_{заг}$ і збільшення значень $V_{п.н.}$, тобто до зменшення опору в'язкого руйнування. Як видно з наведених залежностей, межа міцності і плинності болтів, отриманих ХОШ, збільшується на 7 і 11%

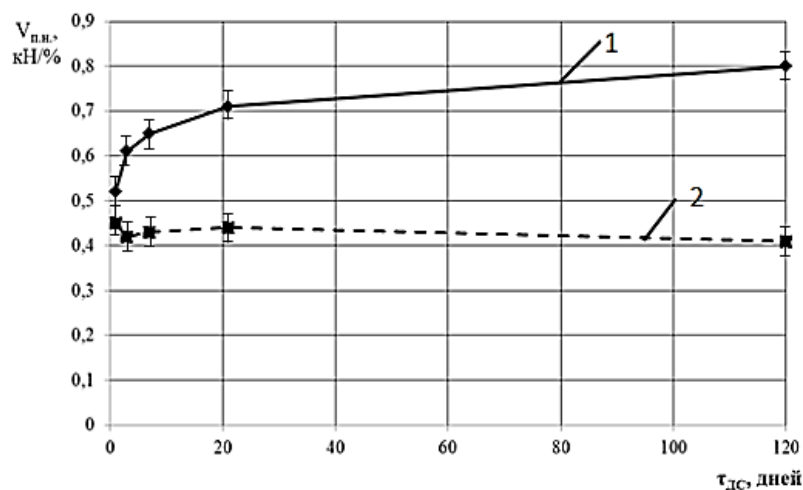


Рисунок 3.29 – Залежність швидкості падіння навантаження в залежності від днів старіння болтів класу міцності 5.8 в початковому стані (1) і після ТВ 400 ° C (2)

відповідно, а відносно рівномірне подовження і загальне подовження знижується на 24 і 36% відповідно під час вилежування після виготовлення протягом 120 днів, що підтверджує перебіг процесів деформаційного старіння в болтах, отриманих ХОШ. Характер кривих зміни властивостей при ДС відповідає відомому, встановленому при дослідженні кінетики ДС на зразках, деформованих на 10% [70]. У той же час деформаційне старіння при температурах 400 - 450 °С, коли відбувається не тільки взаємодія атомів С і N з дислокаціями, а й сприятлива зміна дислокаційної структури, призводить до протилежного ефекту навіть у порівнянні з деформованим станом. При цьому ефект зміцнення практично не знижується. Тому можна рекомендувати зазначений режим деформаційного старіння як позитивно впливає на комплекс механічних властивостей болтів, отриманих ХОШ. Використання даного режиму можна поєднати з технологічною операцією нанесення антикорозійного покриття. Так як тривале природне деформаційне старіння практично не змінює комплекс механічних властивостей, отриманий за рекомендованим режиму деформаційного старіння, то можна вважати, що він забезпечує повний імунітет до природного деформаційного старіння в розвантаженому стані. Особливо важливо, що цей спосіб не просто забезпечує збереження властивостей холоднодеформованих сталевих виробів, а й збереження підвищеного комплексу механічних властивостей в порівнянні з комплексом властивостей після технологічної формуючої деформації, в тому числі підвищену пластичність і опір в'язкому руйнуванню.

3.7. Висновки по розділу 3:

1. Аналіз застосування стрижневих кріпильних виробів конкретного класу міцності свідчить про те, що рівень напружень в різьбових з'єднаннях від затягування дорівнює певній частці від нормованої межі плинності ($\sigma_{0,2}$) або напруги від пробного навантаження (P_H) і ніяк не пов'язаний з нормованою межею плинності (σ_B) болтів або шпильок.

2. Технологія виробництва стрижневих кріпильних виробів (болтів)

методом деформаційно-термічних впливів дозволяє виготовляти готову продукцію без гарту останніх з властивостями міцності за межею плинності ($\sigma_{0,2}$) більше 640 МПа і за межею міцності (σ_B) більше 700 МПа, при значеннях співвідношення $\sigma_B/\sigma_{0,2} \geq 1,05$. З урахуванням висновку по п.1 така продукція може застосовуватися, як кріплення класу міцності 8.8.

3. На підставі визначення характеристик опору руйнуванню, втомної міцності, що вироби, виготовлені шляхом холодної деформації, по службовим характеристикам не поступаються продукції, яка виробляється по традиційній технології з використанням енергоємних операцій загартування та відпуску.

4. Показано, що в багатьох випадках найбільш перспективним методом зниження схильності до деформаційного старіння розглянутих об'єктів є структурний метод, який не вимагає додаткового легування, а заснований на створенні регламентованого структурного стану.

5. Встановлено, що сталеві болти, отримані ХОШ, як і слід було очікувати, схильні до деформаційного старіння, звичайні режими якого зменшують опір грузлому руйнуванню. Показано, що деформаційне старіння в розвантаженому стані при 400 - 450 °С, не знімаючи ефекту зміцнення від холодної деформації і деформаційного старіння, підвищує опір грузлому руйнуванню і практично ліквідує негативний вплив низькотемпературного деформаційного старіння в розвантаженому стані, а також може підвищувати релаксаційну стійкість і опір втомному руйнуванню.

3.8 Список використаних джерел в розділі 3.

У розділі 3 використані джерела [1, 5, 49-70]. Їх найменування представлені у загальному списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 4

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ЗДАВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ СТАЛЕВИХ КРІПІЛЬНИХ ВИРОБІВ

Необхідність розробки нових методів визначення механічних характеристик при одновісному розтягуванні модельних зразків і зразків відібраних від холоднодеформованих виробів насамперед обумовлена такими обставинами. Для багатьох металевих виробів, які виготовляються холодною деформацією (арматурний прокат, кріплення), за останні роки суттєво змінилися вимоги до експлуатаційних властивостей, такі як підвищена деформативність, втомна міцність, вогнестійкість та інші. В нових нормативних документах (НД) - національних та міждержавних стандартах з'явилися характеристики, що раніше не були присутні.

Відомо, що надійність агрегатів машин, механізмів, металоконструкцій і різних споруд (залізобетонних також) залежить від механічних властивостей застосованих металевих виробів (кріплення), тому достовірність визначення їх характеристик міцності, плинності і опору руйнуванню є актуальним. При цьому, з огляду на специфіку зазначених виробів і труднощів визначення показників механічних властивостей таких, як, наприклад, пластичних властивостей, слід застосовувати методи випробування, які дозволяють отримувати характеристики, що відповідають умовам експлуатації.

Існуючи методи визначення механічних властивостей (характеристик) при одновісному розтягуванні зразків металовиробів нормовані стандартами [5], що не змінювалися продовж декількох десятиліть. Так в стандарті [5] не врахована специфіка визначення показників пластичних властивостей для кріплення. Даний стандарт приймемо за основу, і на його прикладі будуть обґрунтовані недоліки і сформульовані пропозиції щодо вдосконалення методів проведення випробувань.

Метод визначення механічних властивостей стрижневих кріпильних виробів [5] включає випробування готового кріпильного виробу на одновісний

розтяг з визначенням межі плинності ($\sigma_{0,2}$), межі міцності (σ_B) і повного відносного подовження ($\delta_{заг.}$) після розриву (для високоміцних виробів передбачено випробування із записом діаграми деформації), а також випробування обточених зразків, виготовлених з готового кріпильного виробу (проточеного круглого гладкого зразка з галтелями на кінцях у вигляді вихідних елементів), і його подальше випробування на розтягнення з визначенням міцностних і пластичних властивостей. Для визначення пластичних властивостей на цьому зразку попередньо наносять розмітку початкової довжини. Після випробування (розриву) контролюють діаметр зразка в місці руйнування і кінцеву довжину зразка. За різницею значень початкових і кінцевих вимірів довжини і діаметру зразка за відомими формулами обчислюють характеристики пластичних властивостей - відносне подовження (δ_5).

Даний метод має недолік, який полягає в тому, що визначення механічних властивостей одного кріпильного виробу, здійснюють на двох різних і різноманітних за типом зразках. Тобто випробування з метою визначення межі плинності і міцності на розтягування і відносного подовження, проводять як на готових кріпильних виробках, так і на оброблених (обточених) болтах з циліндричною ділянкою і збереженням головки та частини різьблення зразків. Такий підхід вносить похибки і не відображає справжніх значень характеристик міцності і плинності кріпильних виробів, визначальним фактором яких служить напружений стан, обумовлений наявністю різьблення (концентраторів напружень). На цю обставину вказувалося раніше [71 - 73] і зазначалося, що випробування оброблених (обточених) зразків спотворює дійсні значення характеристик і може призводити до неправильного призначення класу міцності готової продукції. Ще одним істотним недоліком цього методу є відсутність в ньому визначення на готових кріпильних виробках характеристик, безпосередньо пов'язаних з опором їх руйнування. Тому його неможливо гарантовано використовувати для визначення механічних властивостей різьбових елементів різних видів і типорозмірів, а також їх оцінки опору руйнування, як властивостей, прямо пов'язаних з несучою здатністю

різьбових виробів при експлуатації.

Другим недоліком методу за стандартом [5] є те, що він не дозволяє визначати важливу характеристику – відносне рівномірне подовження (δ_p), яка повинна розглядатися, як характеристика опору макролокалізації пластичної деформації. Відомо, що після вичерпання рівномірного подовження з настанням макролокалізації пластичної деформації починається нестабільна стадія в'язкого руйнування, що відбувається з падінням навантаження в автокатолітичному режимі, тобто з самоприскоренням. Таким чином, на практиці значення δ_p визначає інтервал можливих перевантажень при експлуатації, в якому виріб не втрачає несучої здатності. Але саме значення δ_p не визначається. Також, взагалі не визначаються пластичні властивості натурних (повнорозмірних) болтів, шпильок або гвинтів.

4.1 Шляхи вдосконалення методик контролю заготовки і готових кріпильних виробів

Оскільки необхідний комплекс експлуатаційних характеристик і ресурс виробів отриманих холодної деформацією закладається на стадії їх виробництва, то надзвичайно важливим є контроль якості вихідних матеріалів. Тому особливо важливим є розробка і впровадження поопераційного неруйнівного контролю механічних властивостей і якості заготовки використовуваної для виробництва виробів холодної деформацією. У неруйнівному контролі структури і механічних властивостей сталевих виробів найбільш широко використовується коерцитивна сила H_c . Щоб перейти від механічних випробувань сталі до магнітного контролю, для кожної марки сталі проводять серію паралельних випробувань - магнітних і прямих, традиційних, а потім використовують отримані взаємозв'язки для атестації готової продукції. Так, наприклад, одним із способів підвищення надійності контролю міцності, пластичних і в'язких властивостей прокату за коерцитивної сили є магнітохімічний метод. Його суть полягає в тому, що в рівняннях зв'язку механічних властивостей з параметрами контролю окрім показань коерцитиметра присутній процентний вміст елементів

плавковим хімічного складу, а іноді і характеристики технологічного процесу прокатки (температура кінця прокатки, ступінь обтиску в останньому проході і ін.). Також на якість виробів одержуваних холодної деформацією впливає наявність поверхневих і внутрішніх дефектів в сталі, зараз до 15% металу від заготовки для таких виробів йде в відвал з-за наявності даних дефектів. Впровадження методик магнітних методів дефектоскопії дозволить знизити кількість браку при виробництві кріпильних виробів холодної деформацією, підвищити вихід придатного і знизити витрати на їх виробництво.

При переході до виробництва високоміцних сталевих виробів з вуглецевих сталей за рахунок зміцнення їх тільки в процесі холодної деформації, використовуючи термічну обробку тільки на кінцевій стадії виготовлення виробу для стабілізації структури, слід пам'ятати, що під час волочіння прокату з великими ступенями обтиску крім деформаційного зміцнення відбувається деформаційне старіння, яке може чинити негативний вплив на пластичність металу. Зниження схильності катанки з вуглецевих сталей до статичного і динамічного деформаційного старіння в процесі переділу холодної деформацією, в тому числі волочінням на метизних підприємствах, є важливим показником її якості. Незважаючи на те, що в нормативних документах вимоги за показниками старіння закладаються лише в рідкісних випадках (наприклад, для арматурних сталей по ГОСТ 10884 передбачаються вимоги за підвищеним рівнем ударної в'язкості після старіючого відпуску), реальні параметри структури і рівень властивостей дроту, що сформувалися в катанці в наслідок деформації волочінням, безпосередньо залежать від ступеня розвитку деформаційного старіння, що вказує на необхідність розробки методик по визначенню схильності до деформаційного старіння прокату застосовуваного для виготовлення високоміцних виробів холодної деформацією.

Діючим стандартом [5] передбачається визначення механічних властивостей кріпильних виробів на зразках двох типів: на готових кріпильних виробках і на обточених зразках. При цьому на готових кріпильних виробках визначається тільки межа міцності і загальне подовження (для болтів класу

міцності 4.8 і 5.8), а межу плинності болтів визначають тільки на обточених зразках. Застосування методики визначення механічних властивостей болтів на обточених зразках є не коректним, оскільки не враховує впливу на дані характеристики функціональних надрізів (різьблення) наявних на готових кріпильні вироби, що в свою чергу призводить до значних помилок при визначенні характеристик міцності болтів. Так, наприклад, проведені дослідження [74] показують, що вплив рівня зміцнення на співвідношення меж міцності і плинності готових болтів і обточених зразків можна розділити на два інтервали. В інтервалі значень межі міцності і межі текучості приблизно до 800 Н/мм² і до 700 Н/мм² відповідно більш високі значення розглянутих характеристик фіксуються при випробуваннях готових болтів, а вище зазначених меж - для обточених зразків. Максимальні відмінності даних характеристик доходять до 150 - 200 Н/мм², що багаторазово перевершує помилку експерименту і переводить випробовуваний об'єкт в інший клас міцності. Тому в методиках визначення механічних властивостей болтів (а особливо межі текучості, який лежить в основі розрахунку на міцність різьбових з'єднань) необхідно відмовлятися від проведення випробувань обточених зразків.

Методика визначення вогнестійкості кріпильних виробів не відображає реального їх поведінки в умовах пожежі. Дана методика не враховує реальних умов нагріву і охолодження при пожежі. Проведення термічного впливу на досліджуваний об'єкт шляхом нагрівання до заданої температури, витримки при даній температурі для її вирівнювання по перетину і подальше охолодження на повітрі є далеким від реального пожежі, оскільки в реальних умовах конструкція нагрівається не рівномірно (найбільш сильно температура підвищується в місцях з'єднань елементів), під час пожежі ніколи не буває витримки для вирівнювання температури по перетину, а також охолодження при гасінні пожежі як правило проходить не на повітрі, а під дією води. Методика визначення вогнестійкості також не враховує можливих структурних і фазових перетворень протікають в сталевому виробі при нагріванні і охолодженні. Також одним з найважливіших

положень є, то що дані випробування необхідно проводити коли об'єкт дослідження знаходиться під навантаженням, так як реальні конструкції до початку пожежі знаходяться під дією робочих навантажень.

Кріплення отриманий холодної деформацією без подальшого зміцнення шляхом термічної обробки також схильний до деформаційного старіння. В даний час немає жодної методики по визначенню схильності холоднодеформованого кріплення до деформаційного старіння. Особливу увагу при розробці даних методик слід звернути на те що, слід визначати схильність кріплення не тільки до статичного старіння, а й до старіння під навантаженням, оскільки всі з'єднання збираються з необхідним зусиллям затяжки і сам кріпильний елемент знаходиться під дією не тільки робочих навантажень, але і під дією сили розтягування виникає в стрижні кріплення при його затягуванні.

4.2 Порівняльний аналіз комплексу механічних властивостей, отриманих при випробуваннях готових болтів і обточених зразків

Як зазначалося вище діючих стандартів передбачено, як одне з основних, випробування на одноосьовий розтяг об'єктів двох типів: готових болтів і обточених (з видаленням різьблення) гладких зразків. Як не дивно з позицій основних положень конструктивної міцності, але результати саме останніх випробувань пропонується використовувати при розрахунках болтових з'єднань, що не враховує фактичний вплив на комплекс механічних властивостей готових болтів функціональних надрізів (різьблення). Зазначений вплив визначає дію надрізу, як концентратора напружень в прилеглих обсягах об'єкта, що широко відомо, так і фактору, що змінює ступінь жорсткості напруженого стану в тих же обсягах, що відомо в меншій мірі. Тому наявність надрізу (надрізів) може призводити як до ефекту додаткового зміцнення в термінах нормальних напружень, так і до ефекту знеміцнення, в порівнянні з результатами, отриманими на гладких зразках [75, 76].

Дослідженням в цьому напрямку по болтів присвячені нечисленні роботи [72, 77, 78], причому в роботах [77, 72] вплив різьблення на властивості

встановлено, а автори роботи [76] такий вплив заперечують, хоча наведені в цій же роботі дані свідчать про протилежне. В цілому можна зробити висновок, що систематичні дослідження по доступній інформації в обговорюваному напрямку відсутні, хоча вони, судячи з численних відгуків на роботу [72], отриманих авторами роботи, дуже актуальні.

Матеріалом дослідження були болти розміром М12х1,75 мм виробництва ВАТ "Дніпрометиз" (Україна), Швейцарії, Китаю, Польщі та Росії. Хімічний склад сталей з яких були виготовлені болти наведено в таблиці 3.1.

Болти виробництва ВАТ "Дніпрометиз" (Україна) були виготовлені зі сталі марки 15кп, також на цьому заводі були виготовлені опитна партія болтів за технологією НМетАУ (Україна) з марок стали Ст3пс і 20Г2. Болти виробництва Швейцарії були виготовлені зі сталі 30Г, Польщі - 20Г, Росії - 20Г2 і 10Г2, Китайські - Ст5сп.

Як видно з таблиці 2.3 марки сталі мають в своєму складі певну кількість легуючих елементів. Одним з найважливіший факторів, що визначають експлуатаційні характеристики сталі, є її насиченість легуючими елементами. Вплив введення основних легуючих елементів на властивості даних марок стали наведені нижче.

Вплив вуглецю (С). У сталях наведених в таблиці 3.1 вміст вуглецю становить 0,097 - 0,36%. Саме така частка вуглецю надає найбільш сприятливі властивості для даної сталі, оскільки вона використовується для виробництва деталей методом деформації. Кількість вуглецю є найбільшим фактором, що впливає на механічні характеристики сталі. Зі збільшенням концентрації вуглецю в структурі сталі зростає вміст цементиту. Цементит відрізняється високою твердістю, але крихкий, тому зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі збільшуються її твердість, міцність, зменшуються в'язкість і пластичність.

Отже, склад вуглецю в межах 0,35% обумовлюється тим, що саме така його кількість надає сталі оптимальні механічні властивості для її хорошої деформуємості і виробництва з неї високоміцних кріпильних з'єднань.

Вплив марганцю (Mn). Марганець розширює область стійкого існування γ - Fe, тобто підвищує стійкість аустеніту і збільшує ступінь його переохолодження. Завдяки цьому наявність в сталі марганцю різко зменшує критичну швидкість загартування. Тому марганцовиста сталь прогартовується значно глибше, ніж проста вуглецева.

Основний позитивний вплив марганцю полягає також у зменшенні шкідливого впливу на властивості сталі сірки. Марганець, маючи високу хімічну спорідненість до сірки, утворює сульфід MnS, який при кристалізації металу виділяється з розчину у вигляді тугоплавких, хаотично розташованих включень. Марганець пов'язує сірку в з'єднання MnS, перешкоджаючи утворенню шкідливого з'єднання FeS.

Вплив сірки (S) Практично не впливає на плинність і граничну міцність на розрив. Разом з цим великий вплив робить на поверхневе подовження і в'язкість сталі. Сірка в значній мірі знижує ударну в'язкість і пластичність матеріалу. Крім того, негативно впливає на зварюваність сталі. Сірка в поєднанні з залізом утворює формацію FeS. Ця формація має низьку температуру плавлення і, незважаючи на початку плавлення при температурі прокату сталі, стає причиною красноломкості сталі.

Вплив фосфору (P). Фосфор підвищує плинність і граничну міцність стали на розрив, ще більше погіршує властивості поверхневого подовження і вигин, є причиною виникнення холодноломкості, підвищує здатність до верстатної обробки. Фосфор в складі сталі є залишковим елементом після процесу її виробництва і за небажані властивості по можливості видаляється зі структури сталі.

Болти були отримані холодною висадкою і термічною обробкою за стандартними технологіями метизних підприємств, а також за деякими досвідченим режимам з метою отримання комплексу механічних властивостей в інтервалі 4.8 - 10.9 класів міцності (табл. 4.1).

Випробування на одноосьовий розтяг проводили як на готових болтах (рис. 4.1), так і на обточених до діаметрів 10 - 8 мм зразках з повним видаленням

різьблення (рис. 4.2), де d - номінальний діаметр різьби; d_0 - діаметр випробуваного зразка ($d_0 <$ внутрішнього діаметра різьби); b - довжина ділянки з різьбленням ($b > d$); L_0 - база для визначення подовження ($L_0 = 5d_0$ або $5,65\sqrt{S_0}$); L_c - довжина циліндричної ділянки ($L_c = L_0 + d_0$); L_t - повна довжина ділянки для випробування ($L_t = L_c + b + 2r$); S_0 - площа поперечного перерізу до випробування; r - радіус закруглення ($r \geq 4$ мм) [5].

Використовували машину типу FP - 100/1, в яку досліджувані об'єкти розміщували в спеціальних захопленнях, випробування проводили при

Таблиця 4.1 - Характеристики досліджуваних болтів

Розмір, мм	Клас міцності	Марка сталі	Обробка
M12x1,75x80	4.8	15кп	холодне об'ємне штампування (ХОШ) + відпуск 600 °С
M12x1,75x80	6.8	15кп	холодне об'ємне штампування
M12x1,75x80	6.8	Ст3пс	термічне зміцнення +ХОШ
M12x1,75x80	8.8	20Г2	термічне зміцнення +ХОШ + деформаційне старіння при 300 °С
M12x1,75x80	8.8	10Г2	ХОШ + термічне зміцнення (гарт + відпуск 420 °С)
M12x1,75x70	8.8	Ст5пс	ХОШ + термічне зміцнення
M12x1,75x80	8.8	20Г	ХОШ + термічне зміцнення (гарт + відпуск 420 °С)
M12x1,5x80	10.9	30Г2	ХОШ + термічне зміцнення (гарт + відпуск 420 °С)
M12x1,75 x100	10.9	30Г1Р	ХОШ + термічне зміцнення (гарт + відпуск 420 °С)

швидкості переміщення захоплень 1 мм/хв із записом повної діаграми деформації і руйнування. Крім стандартних характеристик, які визначаються при статичному одноосьовому розтягуванні, особливу увагу звертали на рівномірне подовження, що трактується як характеристику опору переходу до макролокалізації пластичної деформації при навантаженні [77], і на умовну характеристику швидкості падіння навантаження (номінальної напруги) на ділянці локалізованої деформації. Цю характеристику визначали як відношення падіння навантаження (номінальної напруги ΔP ($\Delta\sigma_{\text{ном}}$) від її максимального значення до відповідного моменту руйнування до значення подовження на цій ділянці діаграми ($\delta_{\text{лок}}$). Тип руйнування при зазначених випробуваннях визначали по виду діаграм розтягування і характером макроповерхності руйнування.

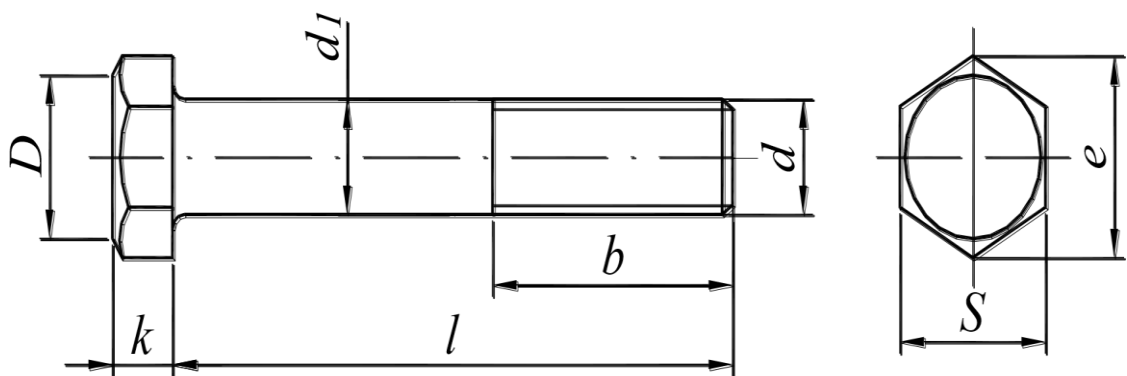


Рисунок 4.1 - Конструкція готового болта з шестигранною головкою по ГОСТ 7798

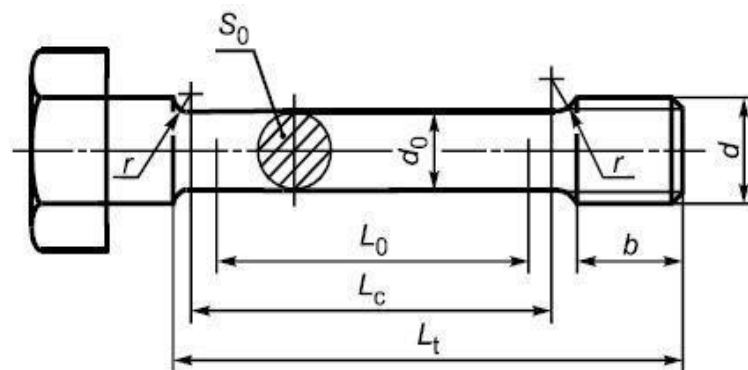


Рисунок 4.2 - Обточений зразок для випробувань на розтяг

максимального значення до відповідного моменту руйнування до значення подовження на цій ділянці діаграми ($\delta_{\text{лок}}$). Тип руйнування при зазначених випробуваннях визначали по виду діаграм розтягування і характером макроповерхності руйнування.

Аналіз механічних характеристик, отриманих на готових болтах і обточених зразках проводили як зіставленням абсолютних значень цих характеристик, так і вивченням кількісних відмінностей між ними в залежності від рівня зміцнення.

За отриманими технічними даними діаграма визначала стандартні механічні характеристики при випробуванні болтів на розтяг: межа плинності, межа міцності, відносне видовження, відносне рівномірне видовження, а також нова характеристика - умовна швидкість падіння навантаження.

Умовна швидкість падіння навантаження визначалася за формулою:

$$V_{\text{п.н.}} = \frac{(\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{руйн.}})}{\varepsilon_{\text{лок}}} \quad (4.1)$$

де σ_{max} - межа міцності, МПа;

$\sigma_{\text{руйн.}}$ - руйнівне напруження, МПа;

$\varepsilon_{\text{лок}}$ - локалізована або нерівномірна пластична деформація, %

Дану характеристику можна використовувати, як параметр стійкості болта проти руйнування при перевантаженнях вище максимального завантаження.

Властивості, отримані при розтягуванні готових болтів і обточених зразків, наведені в таблицях 4.2 і 4.3, а графіки на рис. 4.4 - 4.6 ілюструють вплив рівня зміцнення на якісні (знак) і кількісні відмінності механічних характеристик готових болтів і обточених зразків.

Як випливає з даних рис. 4.4 вплив рівня зміцнення на співвідношення меж міцності і плинності готових болтів і обточених зразків можна розділити на два інтервали. В інтервалі значень межі міцності і межі текучості приблизно до

Таблиця 4.2 - Механічні властивості готових болтів

Марка сталі	Клас міцності	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_p , %	$\delta_{заг.}$, %	$\frac{\Delta\sigma_{НОМ}}{\delta_{ЛОК}} \cdot \frac{Н/мм^2}{Н/мм^2}$, %
15кп	4.8	310	415	11,1	19	14,3
15кп	6.8	523	628	6,15	10,8	32,3
Ст3пс	6.8	613	712	5,53	10,7	37,73
20Г2	8.8	738	835	7,23	11,8	46,4
Ст5пс	8.8	745	904	6,39	10,5	58,3
10Г2	8.8	773	864	6	11	59,82
20Г	8.8	816	903	6,49	10	56,4
30Г1Р	10.9	967	1082	6,62	9,7	95,89
30Г2	10.9	1017	1116	6,56	11	94,69

800 Н/мм² і до 700 Н/мм² відповідно більш високі значення розглянутих характеристик фіксуються при випробуваннях готових болтів, а вище зазначених меж - для обточених зразків.

Примітно, що точки, додатково нанесений на поля графіків рис. 4.4 і відповідна оброблені дані роботи [78] добре лягає в тих ж інтервалах

Таблиця 4.3 - Механічні властивості обточених образів

Марка сталі	Клас міцності	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_p , %	$\delta_{заг.}$, %	$\frac{\Delta\sigma_{НОМ}}{\delta_{ЛОК}} \cdot \frac{Н/мм^2}{Н/мм^2}$, %
15кп	4.8	275,5	431	21,4	33	12,61
15кп	5.8	480	576	6,14	13,74	20,39
Ст3пс	6.8	554,5	633,5	6,35	15,03	26,16
20Г2	6.8	627	738,5	8,79	17,53	32,77
Ст5пс	8.8	742,5	879	9,92	15,85	41,51
10Г2	8.8	840,5	909	9,41	17,03	47,78
20Г	8.8	799,5	910,5	9,1	16,76	43,14
30Г1Р	10.9	1131,5	1185	9,28	13,12	69,71
30Г2	10.9	1140	1183	8,23	14,43	73,6

Максимально фіксуючі відмінності характеристик опору пластичної деформації

доходить до 150-200 Н/мм², що багаторазово перевершує похибку експерименту і переводить випробовуваний об'єкт в інший клас міцності.

Згідно з отриманими даними розрахунок високоміцних болтів ($\sigma_b \geq 800$ Н/мм²) за даними отриманими на обточених зразках, які суттєво завищені в порівнянні з фактичними для готових болтів, може помітно знизити їх надійність і довговічність при експлуатації. З іншого боку, використання даних, отриманий на обточених зразках для класів міцності першого інтервалу на рис. 4.4 дають явну недооцінку фактичної міцності готових болтів і може призвести до зайвої перевитрати металу.

Залучаючи до тлумачення отриманих даних один з принципів геометрично-структурного зміцнення, а саме - вплив надрізу або системи надрізів на характеристики міцності металовиробу, можна, в першому наближенні, зробити наступні висновки.

Зміну міцності, наприклад, межа плинності, при наявності у виробу надріза (надрізів) в порівнянні з таким же подібним виробом, але без надрізу (надрізів) описують в термінах нормальних напружень ($\Delta\sigma_{\text{нор}}$) наступне рівняння (в нашому випадку - для дрібних надрізів) [79]:

$$\Delta\sigma_{\text{н}} = \tau_{\text{т}} (\beta_{\text{н}}/K_{\text{т}} - \beta_0), \quad (4.2)$$

де $\tau_{\text{т}}$ - межа плинності (в термінах дотичних напружень) об'єкт без надрізу (ів);

$\beta_{\text{н}}$ - ступінь жорсткості напруженого стану в області надрізу (ів);

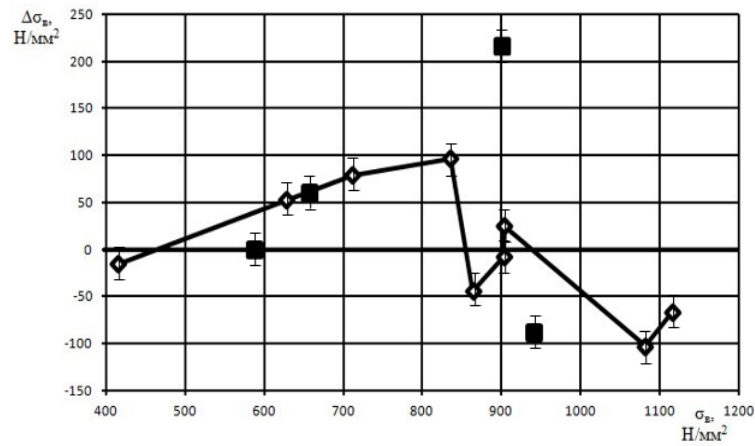
$K_{\text{т}}$ - теоретичний коефіцієнт концентрації напружень в області надрізу (ів) визначається тільки геометрією надрізу;

β_0 - ступінь жорсткості напружений стан, який визначається тільки схема навантаження об'єкта, що не мають надрізи.

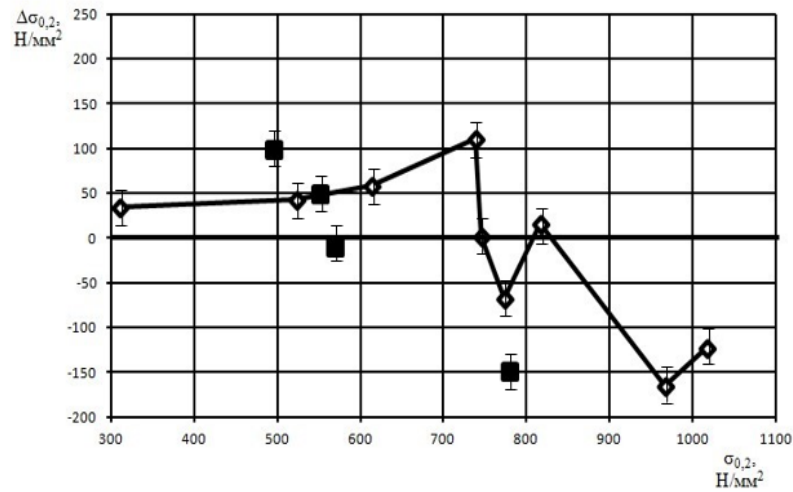
З рівняння випливає, що $\Delta\sigma_{\text{н}} > 0$ (ефект) зміцнення якщо $\beta_{\text{н}}/K_{\text{т}} > \beta_0$, і $\Delta\sigma_{\text{н}} < 0$ (ефект знеміцнення) якщо $\beta_{\text{н}}/K_{\text{т}} < \beta_0$.

За чинними стандартами для звичайних болтів геометрії різьблення,

визначальне значення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень K_t , що



а)



б)

■- точки, отримані обробкою даних роботи [80]

Рисунок 4.4 - Залежність різниці між межами міцності (а) і межами плинності (б) для готових болтів і обточені зразків в залежності від рівня зміцнення за межею міцності (а) і межа плинності (б)

визначаються як

$$K_t = 1 + a \sqrt{\frac{l_n}{\rho_n}}, \quad (4.3)$$

де l_n і ρ_n - відповідно глибина і радіус "дна" надрізу, залишається постійний ($\sim 4,5$, $a =$ приймаючи 1) для всіх досліджених болтів.

Слід, однак, врахувати значення $K_t^{эфф}$ - тобто значення ефективного

коефіцієнта концентрації напружень, який і визначає фактичну концентрацію напружень в реальному об'єкті при його навантаженні. Значення $K_t^{\text{эфф}}$ пов'язані з величиною пластичної релаксації пружних напружень, що призводить до збільшення значень ρ_n і зменшення таким чином концентрації напружень. Логічно думати, що зазначена релаксація напружень залежить від структурного стану металевого матеріалу і тому з ростом рівня зміцнення її значення зменшується, а значення $K_t^{\text{эфф}}$ зростає. Отже, поки дотримується мова $\beta_n/K_t^{\text{эфф}} > \beta_0$ спостерігається перший інтервал на рис. 4.4, а коли постійне зростання $K_t^{\text{эфф}}$ призводить до дотримання умови $\beta_n/K_t^{\text{эфф}} < \beta_0$, то починається другий інтервал співвідношення значень σ_b і $\sigma_{0,2}$ для готових болтів і обточених зразків. Іншими словами, співвідношення σ_b і $\sigma_{0,2}$ готових болтів і обточених зразків в першому інтервалі визначає зміцнюючий ефект різьблення (надрізів), а в другому - знеміцнюючий ефект різьблення (надрізів).

Відмінності в значеннях характеристик пластичності і опору в'язкому руйнуванню (рис. 4.5-4.6) відображає негативний вплив різьблення на зазначені характеристики. У той же час тільки розміщений структурний стан (рекрилізаційний відпал) дає значні відмінності в загальному і рівномірному видовженні для готових болтів і обточених зразків. З ростом рівня зміцнення розглянуті відмінності спочатку істотно зменшуються, а потім, хоча і збільшуються, але не надто інтенсивно. Набагато помітніше різниця для готових болтів і обточених зразків спостерігаються в швидкості падіння номінального напруження на стадії локалізованої деформації і руйнування. При цьому зазначене розходження стає дедалі більше з рівнем міцності (рис. 4.6).

Все перераховане в поєднанні з особливою небезпекою експлуатаційних перевантажень в разі використання для розрахунку високоміцних болтів на міцність результатів випробувань обточених зразків, свідчить про необхідність основну увагу приділяти всебічним випробуванням готових болтів.

4.3 Дослідження мікроструктури випробуваних болтів

Мікроструктуру болтів досліджували згідно відомим методикам і

вимогам ГОСТ 8233-56, ГОСТ 5633-65, ГОСТ 1763-68 за допомогою оптичних мікроскопів МІМ-8 і "Neophot-21". Полірування зразків для мікроструктурних досліджень виробляли механічним способом. Травлення зразків при дослідженнях на мікроскопі здійснювали в спиртовому розчині азотної кислоти.

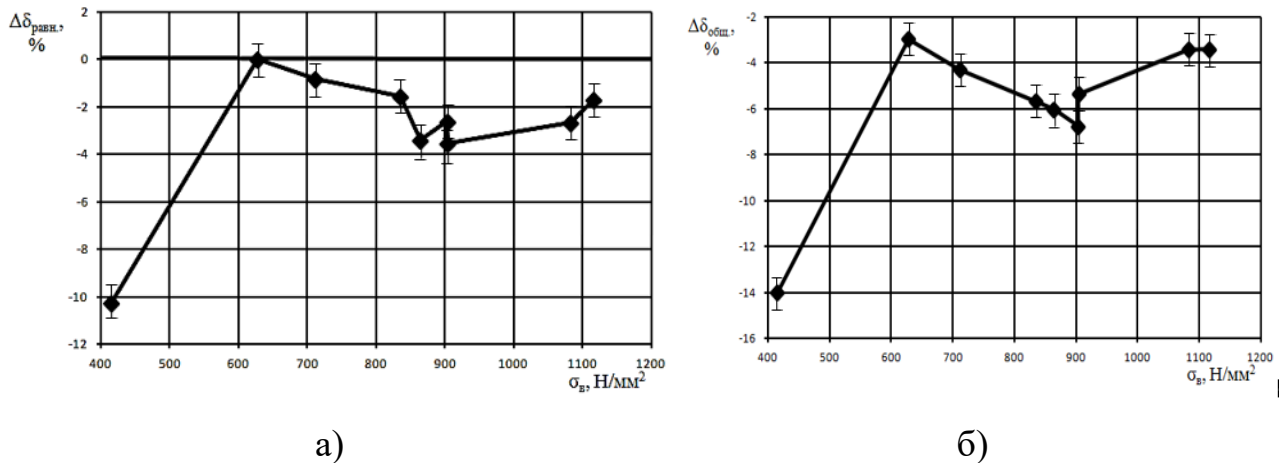


Рисунок 4.5 - Залежність різниці між значеннями рівномірного (а) і загального (б) подовження залежно від рівня зміцнення за межою міцності

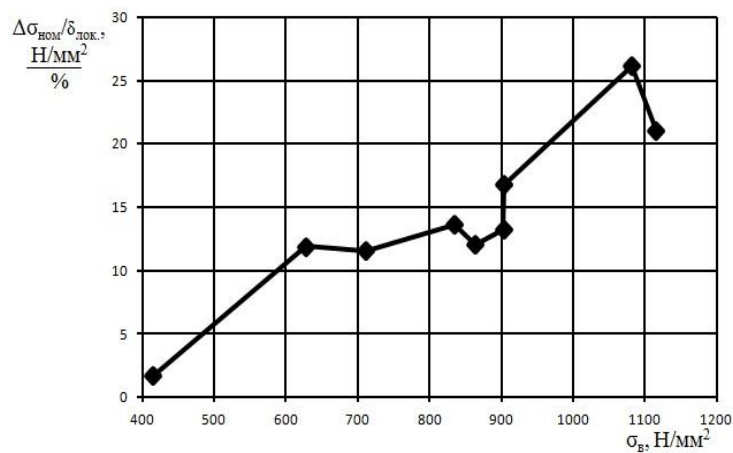


Рисунок 4.6 - Залежність різниці між значеннями умовної швидкості падіння номінального напруження для готових болтів і обточених зразків від рівня зміцнення за межою міцності

Дослідження показали що мікроструктура болтів зі сталі 15кп в початковому стані і після відпуску при 600 °С складається з фериту і перліту, рис. 4.7, 4.8. Структура болтів отриманих за технологією ТМТО зі сталі 20Г2

складається з двох структурних зон, які наведені на рис. 4.9. Поверхневий шар складається з мартенситу відпуску (рис. 4.9, а), структура центральної зони складається з фериту і перліту (рис. 4.9, б). Структура болтів отриманих також за технологією ТМТО зі сталі СтЗпс приведена на рис. 4.10 і складається з мартенситу відпуску (а), перлітових колоній і бейніту відпуску (б) і фериту і перліту (в). Мікроструктура болтів класу міцності 8.8. - 10.9 виготовлених з різних марок сталей і зміцнених за стандартною технологією приведена на рис. 4.11 - 4.15 і складається з троостосорбітної структури.

Як видно з наведених вище даних структура болтів зміцненим за однаковими технологіями не відрізняється в залежності від марки сталі і класу міцності високоміцних болтів. Тому різний вплив системи надрізів на властивості болтів пов'язані зі зміною їх тонкої структури.

Отже, можна вважати, що пояснення отриманих результатів лежить перш за все в використанні системи, коли відбувається взаємодія полів напружень в області металу, близької до надрізу. Мабуть, така взаємодія з ростом рівня

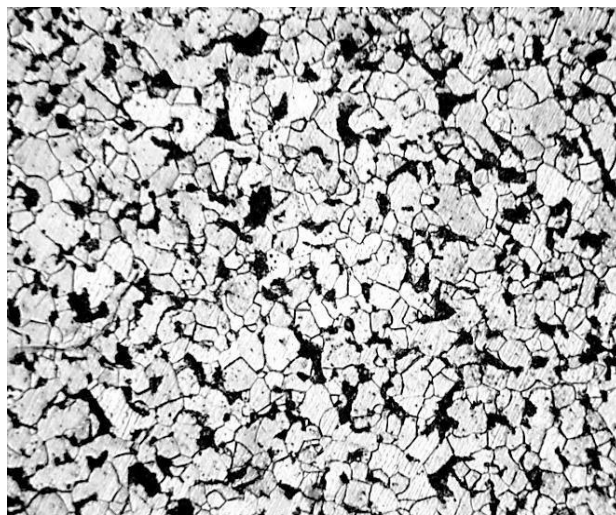


Рисунок 4.7 - Мікроструктура болтів зі сталі 15кп після рекристалізаційного відпалу 600 °С, х500

зміцнення більшою мірою зменшує значення β_n , ніж значення K_t . З переходом від одиничного надрізу до системи надрізів ситуація з факторами, що

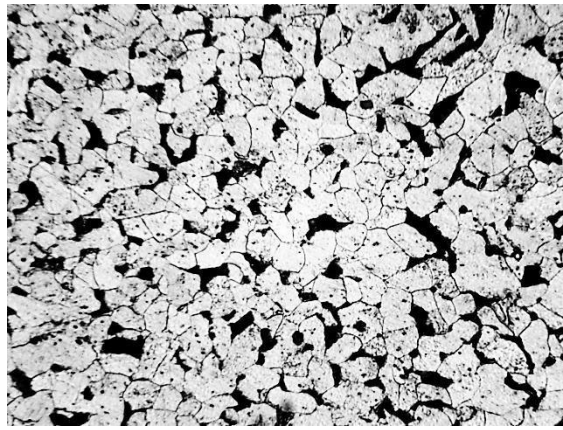
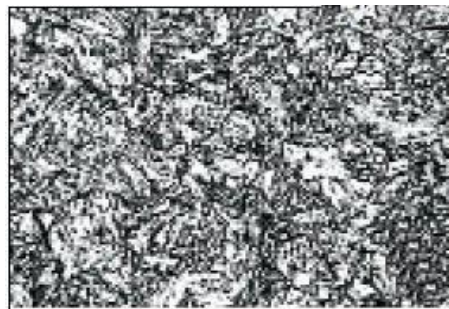


Рисунок 4.8 - Мікроструктура болтів зі сталі 15кп в початковому стані, x500

визначають вплив надрізу на властивості металевого об'єкта, ускладнюється необхідністю розглядати взаємодію полів напружень, що виникають в навантаженому об'єкті у окремих надрізів в системі надрізів, між собою з різними результатами такої інтерференції. Цілком очевидно, що результат взаємодії полів напружень залежить від геометрії окремих надрізів, відстані між ними і - ймовірно - від числа надрізів на одиницю довжини навантаженого об'єкта [80].



а)



б)

Рисунок 4.9 - Мікроструктура центральної (б) і поверхневої (а) зони болта зі сталі 20Г2, $\times 500$

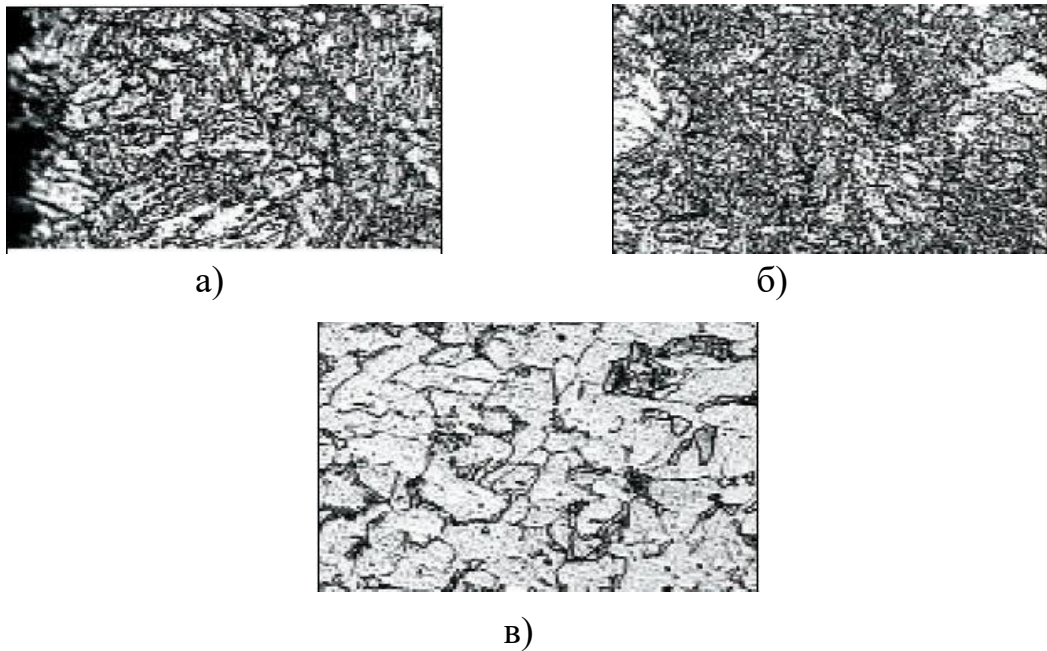


Рисунок 4.10 - Мікроструктура болтів зі сталі Ст3пс: поверхневий шар (а), перехідна зона (б) і центр профілю (в)

4.4 Нові методики визначення пластичних властивостей болтів

Пропонований спосіб забезпечує можливість спрощення визначення механічних властивостей стрижневих різьбових кріпильних виробів при



Рисунок 4.11 - Мікроструктура болтів зі сталі 10Г2, х500

випробуваннях, підвищення достовірності оцінки несучої здатності кріпильних виробів, включаючи опір їх руйнуванню.

Його суть полягає в тому, що випробування на статичне одновісне розтягнення, яке ведуть із записом повної діаграми деформації і руйнування

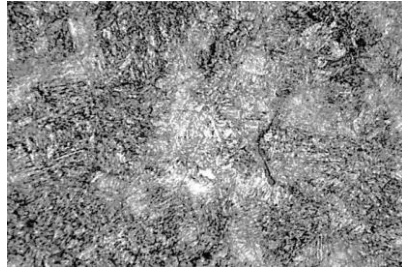


Рисунок 4.12 - Мікроструктура болтів зі сталі Ст5кп, х1000

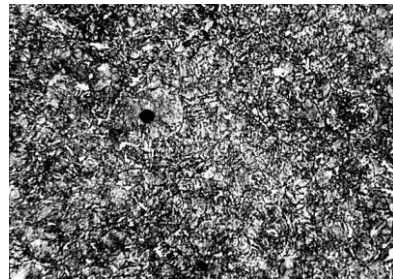


Рисунок 4.13 - Мікроструктура болтів зі сталі 20Г, х1000

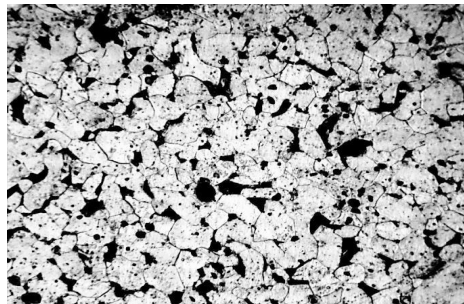


Рисунок 4.14 - Мікроструктура болтів зі сталі 30Г1Р, х500

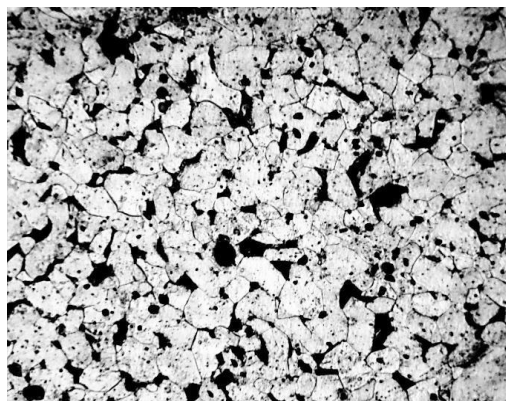


Рисунок 4.15 - Мікроструктура болтів зі сталі 30Г2, х500

проводять на об'єктах тільки одного типу - на готових повнорозмірних кріпильних виробках. В процесі випробування додатково визначають значення відносного рівномірного Видовження δ_p і значення умовної середньої швидкості падіння навантаження на стадії локалізованого подовження $\delta_{лок}$ від P_{max} до навантаження повного руйнування $P_{руйн}$, яка визначається як відношення: $(P_{max} - P_{руйн})/\delta_{лок}$. Показники δ_p і відношення: $(P_{max} - P_{руйн})/\delta_{лок}$ трактують як характеристику опору переходу до макролокалізації пластичної деформації і нестабільної стадії руйнування, і як характеристику опору руйнуванню на цій стадії, відповідно.

Відмінними ознаками запропонованого нового методу є:

- випробування проводять на об'єктах тільки одного типу - на готових повнорозмірних кріпильних виробках;
- в процесі випробування додатково визначають значення відносного рівномірного подовження δ_p (як величини подовження до досягнення при випробуванні максимального навантаження P_{max});
- в процесі випробування додатково визначають значення умовної середньої швидкості падіння навантаження на стадії локалізованого подовження $\delta_{лок}$ від P_{max} до навантаження повного руйнування $P_{руйн}$, яка визначається як відношення: $(P_{max} - P_{руйн})/\delta_{лок}$;
- показники δ_p трактують як характеристику опору переходу до макролокалізації пластичної деформації і нестабільної стадії руйнування, а відношення $(P_{max} - P_{руйн})/\delta_{лок}$ трактують, як характеристику опору руйнуванню на цій стадії.

Додаткове визначення в процесі випробування величини відносного рівномірного видовження δ_p (як величини видовження до досягнення при випробуванні максимального навантаження P_{max}) забезпечує отримання характеристики, яка характеризує виріб щодо його надійності при перевантаженні. Значення δ_p , яке визначається на стадії деформаційного зміцнення, коли навантаження стає дедалі більше до P_{max} , розглядається як величина гранично допустимої деформації, що виникає при можливих

перевантаженнях болтів при експлуатації. Тобто характеризує деформаційний інтервал вище межі плинності, в якому болт зберігає несучу здатність завдяки деформаційному зміцненню і збереженню геометричної подоби деформованого болта вихідному болту до перевантаження.

Додаткове визначення в процесі випробування значення умовної середньої швидкості падіння навантаження на стадії локалізованого подовження $\delta_{\text{лок}}$ від P_{max} до навантаження повного руйнування $P_{\text{руйн}}$, яке визначається як відношення: $(P_{\text{max}} - P_{\text{руйн}})/\delta_{\text{лок}}$, дозволяє судити про механічну поведінку кріпильного виробу при перевантаженнях вище межі міцності. При перевантаженнях, що викликають деформацію більшу за δ_p , настає перехід до стадії локалізованої деформації і нестабільного руйнування. Виріб втрачає геометричну подібність вихідному і, внаслідок переважання геометричного знеміцнення над деформаційним зміцненням, в тому числі за рахунок зменшення «живого» перетину на стадії нестабільного руйнування, сприйняте виробом навантаження постійно зменшується з певною швидкістю до повного руйнування. Тобто, на розглянутій стадії навантаження несуча здатність виробу постійно знижується до нульової, а швидкість цього зниження характеризує опір руйнуванню на його нестабільній стадії.

Трактування показників δ_p , як характеристики опору переходу до макролокалізації пластичної деформації і нестабільної стадії руйнування, та відношення: $(P_{\text{max}} - P_{\text{руйн}})/\delta_{\text{лок}}$, як характеристики опору руйнуванню на цій стадії дають додаткову інформацію про надійність кріпильного виробу. З викладеного вище очевидно, що опір виробу руйнуванню зростає зі збільшенням значення δ_p і зменшенням значення: $(P_{\text{max}} - P_{\text{руйн}})/\delta_{\text{лок}}$.

Приклад виконання нового запропонованого методу 2 визначення механічних властивостей стрижневих різьбових кріпильних виробів пояснюється рисунками 4.16 та 4.17 і результатами випробувань. На рисунку 3.16 показана схема (діаграма) визначення механічних властивостей стрижневих різьбових кріпильних виробів по діаграмі деформації зразків при одновісному розтягуванні запропонованим методом. При цьому визначаються такі

характеристики механічних властивостей, як умовна межа плинності ($\sigma_{0,2}$), межа міцності (σ_B), повне відносне видовження після розриву (δ), відносне рівномірне видовження (δ_p), відносне локалізоване видовження ($\delta_{лок}$).

На рисунку 4.17 представлена діаграма розтягування болта класу міцності 8.8 зі сталі 20Г2, виготовленого за технологією ТМТО (термомеханікотермічної обробки).

Для випробування нового запропонованого визначення механічних властивостей стрижневих різьбових кріпильних виробів відібрали повнорозмірні болти різних класів міцності розміром М12×1,75 мм довжиною 80 мм зі сталі марок 15кп, 10Г2, 20Г2 і 30Г2. Болти зі сталі марки 15кп були виготовлені за технологією: калібровка волочінням гарячекатаної катанки заготовки + холодне об'ємне штампування виробу (ХОШ).

Болти зі сталі марок 10Г2 і 30Г2 були виготовлені за загальноприйнятою технологією термічного зміцнення (ТЗ): відпал гарячекатаної катанки + калібровка волочінням її на заготовку + холодне об'ємне штампування виробу + загартування і відпуск готового виробу. Болти зі сталі марки 20Г2, були виготовлені за технологією ТМТО: термічне зміцнення катанки + калібровка її на заготовку + холодне об'ємне штампування виробу + відпуск (деформаційне старіння) готового виробу. Випробування болтів на одновісний розтяг проводили при кімнатній температурі на машині FP 100/1, як за стандартним методом (готових повнорозмірних і обточених болтів), так і запропонованим

Болти зі сталі марок 10Г2 і 30Г2 були виготовлені за загальноприйнятою технологією термічного зміцнення (ТЗ): відпал гарячекатаної катанки + калібровка волочінням її на заготовку + холодне об'ємне штампування виробу + загартування і відпуск готового виробу. Болти зі сталі марки 20Г2, були виготовлені за технологією ТМТО: термічне зміцнення катанки + калібровка її на заготовку + холодне об'ємне штампування виробу + відпуск (деформаційне старіння) готового виробу. Випробування болтів на одновісний розтяг проводили при кімнатній температурі на машині FP 100/1, як за стандартним

методом (готових повнорозмірних і обточених болтів), так і запропонованим методом (готових повнорозмірних болтів). Параметри проведення випробування: шкала 100 кН, швидкість навантаження - 1,0 мм/хв. У процесі випробування проводили запис діаграми розтягування та реєстрацію значень навантаження і деформації, за якими обчислювали значення характеристик міцності і пластичності. Отримані результати представлені в таблиці 4.4.

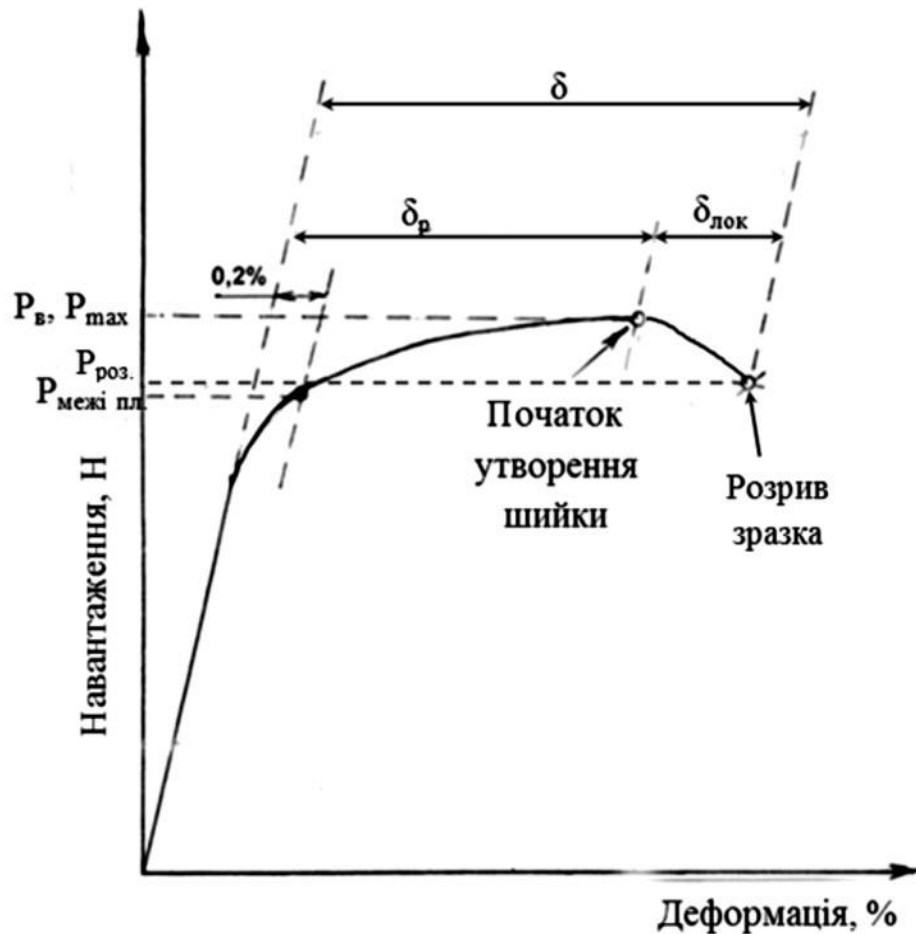


Рисунок 4.16 – Схема визначення механічних властивостей стрижневих різбових кріпильних виробів [76]

Показово, що загальне відносне видовження ($\delta_{\text{заг.}}$) зі збільшенням класу міцності готових болтів з однаковою геометрією різьби від класу міцності 6.8 до 10.9 практично не змінюється, але запропоновані характеристики опору руйнуванню δ_r і $(P_{\text{max}} - P_{\text{руйн.}})/\delta_{\text{лок}}$ помітно зменшуються (в 1,4 та 2,5 рази, відповідно). Це наочно демонструє необґрунтованість використання $\delta_{\text{заг.}}$ як

характеристики опору руйнуванню для різбових стрижневих виробів, як було запропоновано, наприклад в [92].

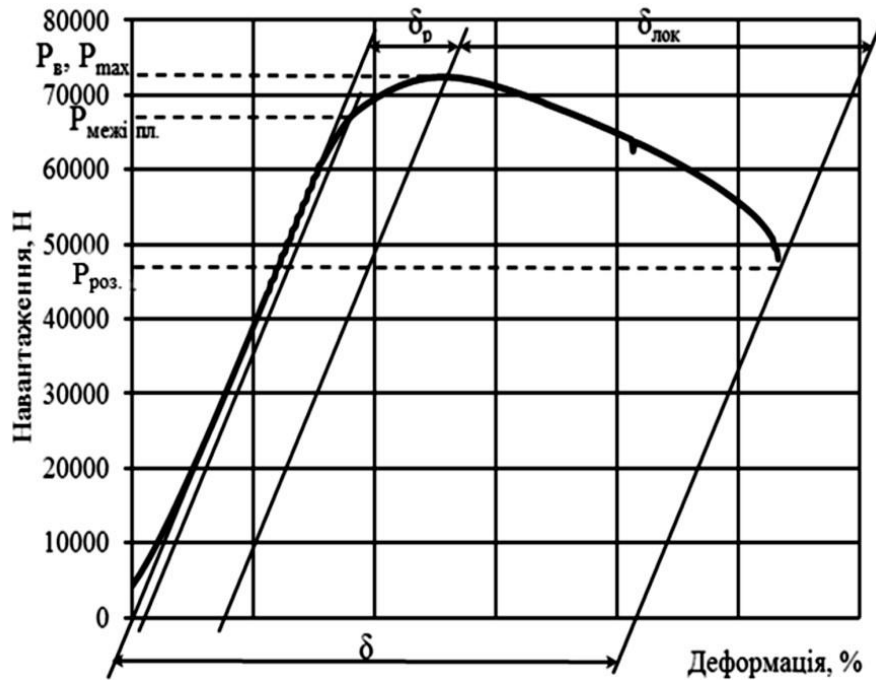


Рисунок 4.17 - Діаграма розтягування болта та схема визначення механічних властивостей стрижневих різбових кріпильних виробів

Порівняння механічних властивостей, які визначаються на готових кріпильних виробих і на обточених зразках показує, що спостерігаються істотні відмінності за всіма визначеними характеристиками. Причому, якщо по показникам σ_B і $\sigma_{0,2}$ до класу міцності 8.8 більш високі значення визначаються на готових кріпильних виробих, то вище вказаного класу - на обточених зразках. Показники пластичності і опору руйнуванню в усьому дослідженому інтервалі нижче для готових кріпильних виробів і ця різниця зростає зі збільшенням класу міцності (див. табл. 4.5).

Наведені експериментальні результати підтверджують висунуте в запропонованому новому методі положення про необхідність проведення випробувань на об'єктах одного типу - готових повнорозмірних кріпильних виробих, а також суттєво більшу чутливість запропонованих характеристик опору руйнуванню.

Таблиця 4.4 - Механічні властивості болтів, які визначаються за стандартним методом і запропонованим методом

№ зразка	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	R_{max} , кН	σ_b , Н/мм ²	$R_{роз.}$, кН	$\delta_{заг.}$, %	δ_p , %	$\delta_{лок.}$, %	$\frac{R_{max}-R_{роз.}}{\delta_{лок.}}$, кН/%	Клас міцності, марка сталі, технологія виготовлення
Визначення механічних властивостей за стандартним методом									
1	583,6*	52,84	626,81	-	9,6	-	-	-	6.8, сталь 15кп ХОШ
	515,8**	28,48	604	-	11,6	-	-	-	
2	750*	70,48	836,1	-	9	-	-	-	8.8, сталь 20Г2 ТМТО
	598,2**	36,03	735,3	-	16,0	-	-	-	
3	755,6*	72,43	859,2	-	8,73	-	-	-	8.8, сталь 10Г2 ТЗ
	750,5**	43,78	902,7	-	14,8	-	-	-	
4	1077,6*	97,73	1109,3	-	9	-	-	-	10.9, сталь 30Г2 ТЗ
	1128,9**	57,54	1153,1	-	13,7	-	-	-	
Визначення механічних властивостей запропонованим									
5	583,6*	52,84	626,81	39,07	9,6	4	5,6	2,46	6.8, сталь 15кп ХОШ
6	750*	70,48	836,1	51,3	9	3,45	5,55	3,46	8.8, сталь 20Г2 ТМТО
7	755,6*	72,43	859,2	48,0	8,73	3,13	5,6	4,36	8.8, сталь 10Г2 ТЗ
8	1077,6*	97,73	1109,3	60,34	9	2,83	6,17	6,06	10.9, сталь 30Г2 ТЗ

*) – результати при випробуванні готових болтів;

**) – результати при випробуванні болтів обточених на діаметр 9 мм.

Таблиця 4.5 – Характеристики опору руйнуванню за запропонованим методом, визначені на готових кріпильних виробках та обточених зразках

Технологія зміцнення	Клас міцності	Готові кріпильні вироби		Обточені зразки	
		δ_p , %	$\frac{R_{max}-R_{роз.}}{\delta_{лок.}}$, кН/%	δ_p , %	$\frac{R_{max}-R_{роз.}}{\delta_{лок.}}$, кН/%
ХОШ	6.8	4,0	2,46	3,3	1,0
ТМТО	8.8	3,45	3,46	7,16	1,45
ТЗ	8.8	3,13	4,36	6,22	2,06
ТЗ	10.9	2,83	6,06	4,44	2,89

Порівняння результатів експериментів для болтів одного класу міцності (8.8), проти зміцнених за різними технологіями: гартування з відпуском та ТМТО, що визначені переваги за опором руйнуванню: $(R_{max} - R_{руйн.})/\delta_{лок.}$ має остання технологія (таблиця 4.4). Отже, запропонована характеристика чутлива

не тільки до характеристик рівня міцності, але і до типу структурного стану, який формується при тій чи іншій технології зміцнення. При цьому, раніше використані властивості не мають такої чутливості. Тому, обґрунтовано перспективне використання запропонованого методу при розробці нових технологій зміцнення різьбових стрижневих виробів.

На підставі вищевикладеного, можна зробити висновок, що запропонований новий метод, порівняно легко реалізується на практиці та вимагає при його використанні меншої (в 2 рази) кількості зразків, має більшу інформативність, ніж відомий. Цілком обґрунтовано його використання в технологічних процесах виробництва різьбових стрижневих виробів на етапі контролю та сертифікації готових виробів, експертної оцінки властивостей нових видів кріпильної продукції, при оптимізації геометрії кріпильних виробів та розробці нових технологій їх зміцнення.

4.5 Характеристики макролокалізації пластичної деформації при одноосьовому розтягуванні сталевих об'єктів

При оцінці конструктивної міцності металовиробів, в тому числі характеристик опору руйнуванню, основна увага приділяється визначенню характеристик опору крихкому руйнуванню внаслідок його низької енергоємності і катастрофічності протікання його заключної нестабільної стадії: високій швидкості протікання процесу при постійній або знижується навантаження або взагалі без зовнішнього підведення енергії. До сих пір досить широко поширена думка, що якщо навантажуваний об'єкт знаходиться в в'язкому стані, то його механічна поведінка відносно стабільно і навіть стадія руйнування не має зазначених вище ознак катастрофічності. Такий підхід, однак, потенційно небезпечний. Досить давно зверталась увага на небезпеку і можливість протікання в навантаженому об'єкті т. зв. в'язкого руйнування по крихкому типу, якщо в навантаженому об'єкті виражений процес локалізації пластичної деформації [81]. Останній, як відомо, характеризується зосередженням пластичної деформації в локальних обсягах і високою швидкістю протікання

процесу пластичної деформації. Так як по А.Х. Коттреллу роль пластичної деформації при в'язкому руйнуванні полягає в "відводі матеріалу від фронту зростаючої тріщини" [82], то небезпека в'язкого руйнування навантаженого об'єкта по крихкому типу прямо пов'язана зі ступенем схильності металу в даному навантажувати об'єкті до локалізації пластичної деформації. Отже, актуальним завданням є дослідження і розробка методик визначення характеристик опору в'язкого руйнування навантаженого об'єкта як характеристик умов переходу мікролокалізації пластичної деформації (характерною для будь-якої стадії пластичної деформації анізотропного матеріалу) в макролокалізації пластичної деформації. Принципово важливим тут є обговорення та експериментальна перевірка коректності канонічних рівнянь Консідера-Харта, що зв'язують значення рівномірної деформації ϵ_p з характеристиками деформаційного зміцнення при розгляді матеріалу навантаженого об'єкта як ізотропного і при відсутності істотних відхилень властивостей мікрооб'ємів від середніх їх значень макрооб'ємів навантажувати об'єкта [83]. Всього через 5 років після публікації роботи [84] було показано, що при деформаційному старінні сталі збільшення швидкості деформаційного зміцнення супроводжується зменшенням значень ϵ_p , що суперечить рівнянню роботи [85] і було підтверджено в подальшому [86]. У докладному аналітичному огляді [87] з посиланням на роботи 1990 - 1997 х років (див. напр. [88]) також ставляться під сумнів рівняння роботи [85]. Однак, поки що не запропоновані інші, адекватні по своїй простоті і можливостям експериментальної перевірки вираження, в порівнянні з рівнянням Консідера-Харта. Та й статистична перевірка останнього не проводилася, так само як і причини відхилень від них не досліджені в належній мірі. Дана робота по обґрунтуванню можливості визначення характеристик опору в'язкого руйнування при одноосьовому розтягненні проведена з урахуванням викладеного вище.

Експерименти проведені на різних зразках діаметром від 6 до 10 мм, виготовлених з різних марок низьковуглецевої сталі з вмістом вуглецю від 0,04 до 0,20% (мас. доля) і з різним структурним станом. Досліджували також натурні

металовироби (болти) з наявністю функціональних надрізів (різьблення). Різна структурним станом досліджуваних об'єктів досягалося: різними способами формування геометрії навантажувати об'єкта (гаряча і холодна деформація), режимами термічної обробки, способом і ступенем холодної деформації з наступним старінням при різних температурах. Всі перераховані об'єкти піддавали одноосьовому розтягуванню на машині FP 100/1, із записом повних технічних діаграм деформації і руйнування (ТДР) з подальшою розбудовою їх в істинні і визначенням істинної рівномірної деформації ϵ_p і коефіцієнта деформаційного зміцнення n в рівнянні Холломона. На одному з об'єктів - низьковуглецевої катанки - в стані поставки і після холодної деформації на різну ступінь розтягуванням і крутінням з подальшим старінням при різних температурах досліджували вплив 78 режимів термічної і деформаційної обробки на зазначені вище властивості при розтягуванні. Оскільки кожному типу режиму піддавали 5 зразків, то отримана вибірка з 78 незалежних величин - результат 390 випробувань. На основі цієї вибірки шляхом її статистичної обробки відомими методами досліджували ступінь кореляції між ϵ_p і n і вид одержуваних рівнянь регресії. Схема одновісного розтягу обрана тому, що при ній особливо наочно проявляється роль деформаційного зміцнення (ДЗ) і геометричного знеміцнення (ГЗ) в умовах переходу від мікролокалізації пластичної деформації до макролокалізації пластичної деформації. Отримані дані аналізували, в тому числі із залученням підходів, описаних в роботах [83, 84].

Аналіз показує, що область рівномірної деформації (ОРД), що характеризується збереженням геометричної подібності навантажувати об'єкта вихідного, може як існувати на ТДР, так і практично відсутні на них в залежності від вихідного структурного стану навантажувати об'єкта (див. рис. 4.18, а). При цьому спостерігаються 4 основні варіанти перебігу функції $P = f(\Delta l)$: 1) ОРД відповідає зростанню P з ростом Δl при наявності добре вираженого максимуму P ; 2) ОРД відповідає зростанню P і зразковому сталості P з ростом Δl (дві стадії ОРД при "розмитому" максимумі P); 3) ОРД збігається тільки з другої стадією

ОРД по 2-му варіанту; 4) ОРД практично відсутній: макролокалізації пластичної деформації починається відразу при переході до макролокалізації пластичної деформації. Останній варіант має місце - в досліджених межах - тільки за певних нерівноважних вихідних структурний стан: зміцнення холодної деформацією + низькотемпературне старіння. Так як після ОРД слід стадія макролокалізації пластичної деформації, що супроводжується нестабільною стадією в'язкого руйнування, тобто повна втрата несучої здатності навантажувати об'єкта, то збільшення опору в'язкого руйнування можна очікувати (за інших рівних умов) в наступній послідовності варіантів на рис. 1, а: 4), 3), 1), 2). Іншими словами, виражена стадія деформаційного зміцнення з розмиттю подальшим переходом до етапу переважання ГЗ над ДЗ - забезпечить найбільший опір в'язкому руйнуванню навантажувати об'єкта. Звичайно, тут важлива і протяжність ОРД - значення ϵ_r , причому, особливо на стадії переважання ДЗ над ГЗ. Тому при 2-му варіанті слід вказувати не тільки загальне значення ϵ_r , але і значення стадії ОРД, де ДЗ > ГЗ. Похідна $P = SF_x$ за ступенем деформації ϵ :

$$\frac{\partial P}{\partial \epsilon} = \frac{\partial S}{\partial \epsilon} F_x - S \frac{\partial F_x}{\partial \epsilon}, \quad (4.4)$$

де S - справжнє напругу;

F_x - справжня площа поперечного перерізу навантажувати об'єкта, дозволяє визначити умова отримання ОРД

$$\frac{\partial S}{\partial \epsilon} \cdot F_x \geq \frac{\partial F_x}{\partial \epsilon} \cdot S, \quad (4.5)$$

як переважання або рівність швидкості ДЗ щодо швидкості ГЗ. Умова за виразом (4.5) відрізняються від умови Косідера-Харта: максимальне значення ОРД обмежена рівностями $S = \partial S / \partial \epsilon$, а $\epsilon_{r\max} = n$. Цим з одного боку, виключаються експериментально спостережувані варіанти 2) і 3) (рис. 4.18, а), а з іншого не враховується ймовірний вплив величини дисперсій розподілу

значень $\partial S/\partial e$ і $(\partial F_x)/\partial e$ в мікрооб'ємах реальних металевих навантажуються об'єктів на обмеження ОРД. Цілоком ймовірно також, що при реалізації варіантів ОРД з дотриманням зразкової рівності ДЗ і ГЗ початкова стадія в'язкого руйнування, що відбувається як освіта "вакансійних" пір (ВП) [89], може не тільки посилювати ГЗ через зменшення "живого" перетину навантажувати об'єкта, а й посилювати ДЗ, даючи ефект своєрідного твердіння [90]. Узагальнення отриманих експериментальних даних, наведене на рис. 4.18, б, показує, що ці дані, з одного боку, підтверджують сприятливий вплив збільшення інтенсивності ДЗ на значення e_p як характеристики опору в'язкого руйнування. З іншого боку, тільки при порівняно рівноважному вихідному структурному стані експериментальні точки відповідають рівнянням $e_p = n$, але при зміцненні холодної деформацією з подальшим старінням, а також при наявності у навантажувати об'єкта функціональних надрізів (різьблення) - відхилення від зазначеного рівняння істотні.

Дані, наведені на рис. 4.19, показують, що при використанні досить великої вибірки з істотно різними структурними станами стали як порівняно рівноважними, так і нерівноважними, спостерігається хороша статистично достовірні кореляція в формі лінійної зростаючої залежності між значеннями $e_p = f(n)$. При цьому зазначена залежність цілоком описується рівнянням $e_p = \alpha n$, де α , хоча і менше одиниці, але близький до неї. Отже, статистично експериментально в загальному підтверджується це рівняння Консідера-Харта у всякому разі для низьковуглецевої сталі, що піддається холодної деформації одноосьовим розтягуванням в умовах слабкої швидкісний залежності деформуючого напруги. У той же час добре видно, що більшість експериментальних точок лежить нижче прямої, що відповідає рівнянню $e_p = n$, тобто кількісні відхилення від канонічного рівняння мають місце в більшості досліджених випадків.

Доцільно, однак, розглядати ці відхилення не як підставу некоректності канонічного рівняння (адже статистично e_p зростає зі збільшенням n), а - з урахуванням зазначених вище припущень при виведенні рівнянь Консідера-

Харта - як кількісну міру дисперсії розподілу значень $\partial S / \partial e$ в мікрооб'ємах навантаженого об'єкта. Останнє дозволяє розглядати значення $(n-e_p)$ як важливу складову запропонованої характеристики опору в'язкого руйнування: e_p і $(n-e_p)$, а з іншого боку, - вирішувати задачу: істотно не змінюючи інших властивостей навантаженого об'єкта (наприклад, рівня міцності), зменшувати значення $(n-e_p)$ за рахунок збільшення однорідності властивостей мікрооб'ємів.

4.6 Підвищення тріщиностійкості високоміцних кріпильних виробів

Крихке руйнування металів має широке поширення. Іноді конструкції, спроектовані за критеріями граничного пластичного руйнування, відчують катастрофічне крихке руйнування [91]. Один і той же метал в певних умовах експлуатації може руйнуватися пластично, в інших умовах - тендітний. Крихке руйнування викликається зростанням тріщин, які раптово стають нестійкими і поширюються зі швидкістю звуку в матеріалі. У зв'язку з цим воно найнебезпечніше, непередбачувано і вимагає серйозного вивчення.

Досвід експлуатації реальних виробів і аналіз аварій показують, що розрахунок деталей на міцність не забезпечує необхідну надійність роботи конструкції, що мають дефекти типу тріщин. Тріщини в металі можуть мати технологічне походження або зароджуватися і зростати в процесі експлуатації. Тому в практику оцінки властивостей конструкційних матеріалів необхідне впровадження методів, які пророкують зв'язок між руйнують напруженнями і розмірами дефектів.

Опір нестабільного поширенню тріщини або тріщиностійкість металів при статичному навантаженні оцінюють по одному або декільком критеріям руйнування:

- а) силовому - критичного коефіцієнту інтенсивності напруг K_{1c} ;
- б) деформаційному - критичного розкриття в вершині тріщини δ_c ;
- в) енергетичного - критичного значення J-інтеграла J_{1c} , (роботи пластичної деформації і руйнування) [92].

Енергетичні критерії при прогнозуванні руйнування металу при втомному навантаженні розглядалися А.М. Щипачова [93, 94]. Відомо, що втомна тріщина росте, здійснюючи мікроскачки при кожному циклі навантаження.

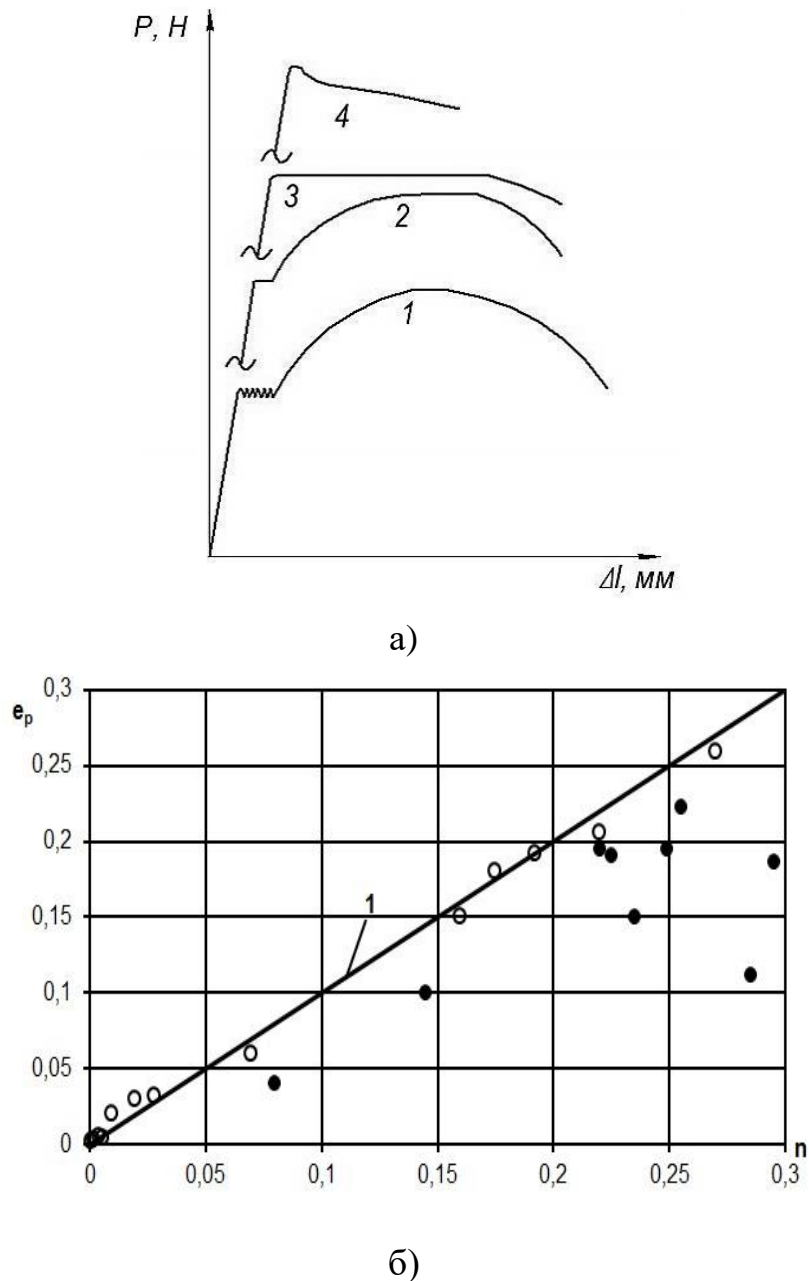
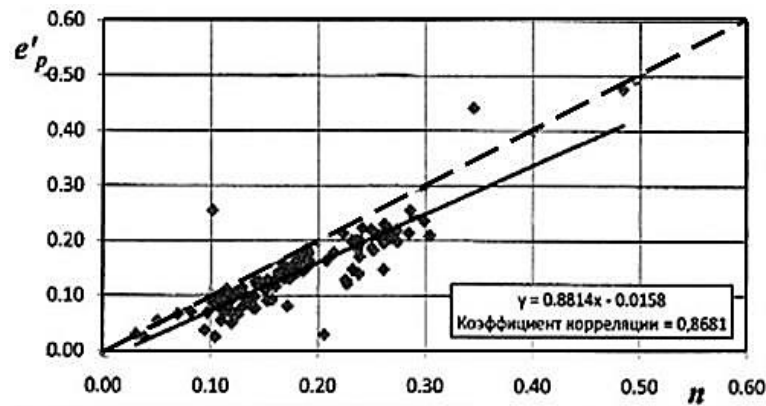
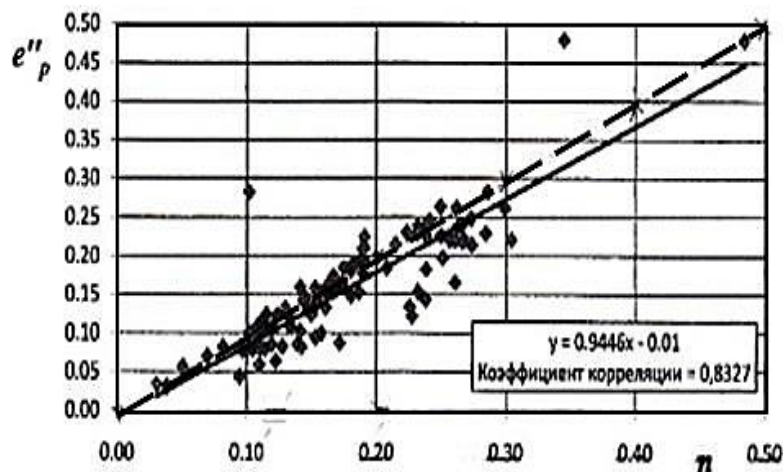


Рисунок 4.18 – Спостережувані в експерименті варіанти зміни навантаження вище межі текучості (схеми) для сталей з низьковуглецевої сталі з різним вихідним σ_s (а) і залежність між значеннями коефіцієнта деформаційного зміцнення n і рівномірної деформації ϵ_p за рівнянням Консідера-Харта (1) і дані експериментів в досліджених межах (точки) (б)



а)



б)

Рисунок 4.19 – Кореляційна залежність між значеннями рівномірної деформації e_p і значеннями коефіцієнта деформаційного зміцнення n низьковуглецевої сталі, підданої різним режимам термічної і деформаційнотермічної обробки: а - визначення e_p по точці закінчення збільшення навантаження; б - визначення e_p по серединній точці відрізка зразкового сталості навантаження

Як було показано [95], величина мікроскачка пов'язана з накопиченням в мікрообсязі матеріалу критичної щільності прихованої енергії, яка корелює з твердістю металу [96, 98]. Авторами [99] було показано, що в міру циклічного напрацювання відбувається трансформація статистичних розподілів фізичних характеристик матеріалу в статичне, що є характерним для катастрофічного стану.

Найбільш часто використовуваним критерієм є силовий критерій. Експериментальне визначення величини критичного коефіцієнта інтенсивності

напружень K_{1c} дозволяє встановити величину критичного напруження, при якому тріщина, що має певну довжину, стає нестабільною і починає швидко рости. Тобто, знаючи величину K_{1c} і довжину тріщини, можна судити про міцність конструкції.

Методи експериментального визначення характеристик тріщиностійкості в даний час достатньо розроблені і регламентовані відповідними нормативними технічними документами (НТД) для різних видів навантаження [88, 100, 101].

Відомо різноманіття кріпильних порожніх виробів (болт, штуцер, шпилька та ін.), які застосовуються в автомобілебудуванні, моторобудуванні, авіабудуванні та інших галузях. Основне призначення такого кріплення - створення і функціонування паливних, масляних, гальмівних, охолоджуючих та інших систем по яким здійснюється рух рідин, мастил, палива чи повітря. Прикладом можуть служити порожнисті болти по ГОСТ 25682-84 для різьбових поворотних з'єднань трубопроводів. Основне призначення даного кріплення в таких системах це створення герметичності системи в різних переходах і з'єднаннях. При цьому до кріплення не пред'являються високі вимоги по механічним властивостям особливо до показника тріщиностійкості K_{1c} .

Відомий ряд технічних рішень, де виконання кріпильних елементів з порожнинами використовується з метою підвищення механічних властивостей [101], який має базову конфігурацію стрижневого кріплення, при цьому в його тілі виконана поздовжня порожнина з утворенням наскрізного каналу. Внутрішня поверхня тіла стрижневого кріплення, що обмежує порожнину, зміцнена. Внутрішня та/або зовнішня поверхні або їх частини виконані профільованими у вигляді різьблення. В результаті декларується (без подання відповідних чисельних даних) підвищення ресурсу використання кріплення при циклічних навантаженнях.

Однак даний винахід не гарантує підвищення несучої здатності і надійності нарізного сполучення так як не нормує геометричних розмірів порожнини і не пов'язує їх з рівнем статичної міцності.

Також відомо різьбовий кріпильний елемент [102], що містить стрижень з різьбленням на зовнішній поверхні та наскрізним осьовим отвором, при цьому зовнішній діаметр стрижня дорівнює 1,4-1,5 діаметра отвору. Дане технічне рішення дозволяє збільшити втомну міцність різьбового елемента на думку авторів, без приведення ними відповідних даних.

Недоліками відомого нарізного кріплення є:

- Хоча винахід, що розглядається, унормовує геометричні розміри порожнини, але як і раніше не пов'язує їх з рівнем статичної міцності;
- не забезпечує можливості кількісного розрахунку характеристики опору руйнування і тим самим розрахунку на міцність різьбового елемента.

Отже, винахід (прототип) не можливо гарантовано використовувати для різьбових елементів різних класів міцності і проводити кількісну оцінку їх експлуатаційної надійності.

Пропонований різьбовий кріпильний елемент виконується у вигляді стрижня з різьбленням на зовнішній поверхні та наскрізним осьовим отвором, виготовляється із сталі з межею текучості від 500 до 1200 Н/мм², а товщина стінки елемента визначається по залежності:

$$\delta = \exp \left[-0,3694(\ln \sigma)^2 + 2,0673(\ln \sigma) + 5,5744 \right] \pm 1 \quad (4.6)$$

де: δ - товщина стінки елемента, мм;

σ - межа плинності металу елемента, МПа, а 0,3694; 2,0673 і 5,5744 - коефіцієнти, отримані дослідним шляхом після обробки експериментальних даних по визначенню впливу межі текучості металу на товщину стінки елемента, що забезпечує максимальне значення в'язкості руйнування (K_{1c}), як характеристику тріщиностійкості.

Технічний результат пропонованого рішення полягає в отриманні різьбових кріпильних елементів з підвищеною експлуатаційною надійністю різних класів міцності із сталей рядового складу. Досягнення зазначеного

технічного результату забезпечується тим, що пропонований різьбовий кріпильний елемент містить стрижень з різьбленням на зовнішній поверхні та наскрізним осьовим отвором і виконаний зі сталі з межею текучості від 500 до 1200 Н/мм², а товщина стінки елемента визначається в залежності від значення межі текучості сталі. Порівняльний аналіз пропонованого кріпильного виробу з відомими дозволяє зробити висновок, що різьбовий кріпильний елемент, який заявляється, відрізняється від відомого тим, що виконується зі сталі з різною межею текучості, тобто виробляється виріб різного класу міцності під конкретні умови застосування, а вибір товщини стінки здійснюють за певною формулою, Що забезпечує максимальний рівень конструктивної міцності (оптимальне поєднання рівня межі текучості і в'язкості руйнування, тобто тріщиностійкості).

Пропонований різьбовий кріпильний елемент має базову конфігурацію стрижневого кріплення і може бути виконаний у вигляді шпильки, болта, або іншого кріпильного елемента, які використовуються для з'єднання та кріплення різних деталей, з різьбленням на зовнішній поверхні та наскрізним осьовим отвором. На рис. 4.20 та 4.21 наведено різьбовий кріпильний елемент у вигляді болта 3, де різьблення довжиною L3 виконано на всій довжині циліндричної ділянки, який має суцільний отвір 6. На другій торцевій ділянці сформовано потовщення в вигляді шестигранною головки 5 (порожнистий болт з різьбою під головку). На рис. 4.4 наведено різьбовий кріпильний елемент у вигляді болта 4 з різьбленням на торцевій ділянці довжиною L4, який має суцільний отвір 6. При цьому на поверхні між ділянкою з різьбленням на одному торцевому кінці і голівкою 5 на іншому торцевому кінці є гладка частина зовнішньої поверхні (порожнистий болт з гладкою частиною зовнішньої поверхні і ділянкою з різьбою). Як показано на кресленнях, відмітною особливістю пропонованого нарізного кріплення у вигляді шпильки або болта є наявність наскрізного осьового отвору 6 і товщина стінки елемента δ , яка визначається розрахунковим шляхом (за формулою) виходячи з характеристики межі текучості сталі, з якої виконано виріб.

Приклад виконання пропонованого різьбового кріпильного елемента.

Дослідні зразки нарізного кріплення виготовляли у вигляді порожньої шпильки з різьбленням по всій довжині розміром М42. Для цього використовували трубу із сталі 35 із зовнішнім діаметром 42 мм і наскрізним осьовим отвором діаметром 19 мм (товщина стінки 11,5 мм).

Трубу різали на відрізки (заготовки) у вигляді стрижнів довжиною по 400 мм. Попередньою термічною обробкою (гартування + відпуск) на заготовках формували рівень міцності за межею текучості 1000 Н/мм^2 . На різьбонакатному верстаті на зовнішній поверхні стрижнів накручували різьбу розміром М42х3 (ГОСТ 1759.4). Товщина стінки δ нарізного кріплення (по западині різьби) становила 9,0 мм, що є еквівалентом по площі болта М30 з суцільним перерізом (площа 560 мм^2). Для порівняння критерію (показника) K_{1c} вибирали товщину стінки полого нарізного кріплення, яка дорівнювала більше або менше

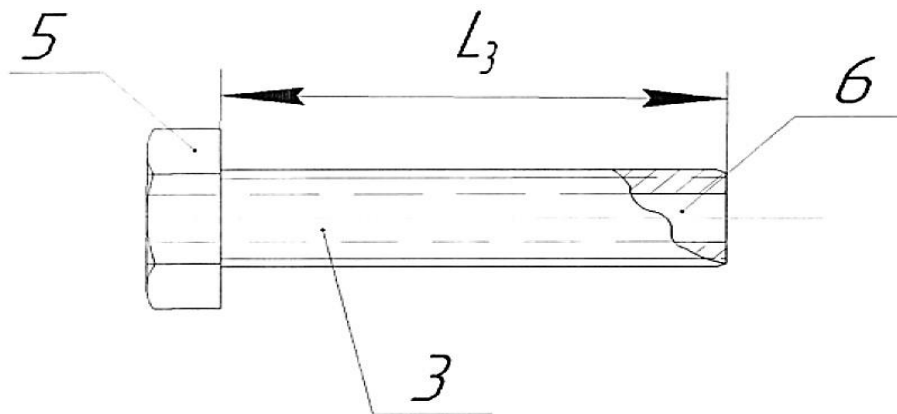


Рисунок 4.20 – Креслення виконання отвору у болті з різьбою під головку за пропонованим методом

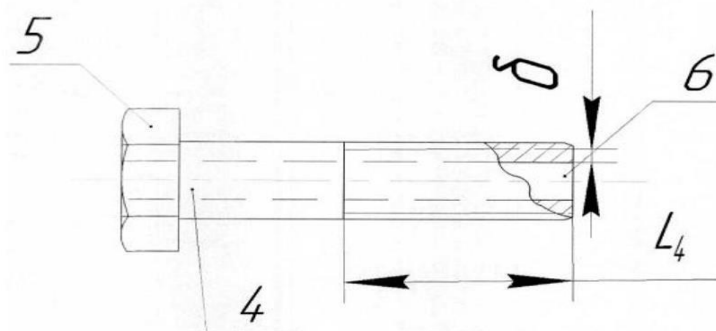


Рисунок 4.21 – Креслення виконання отвору у болті з неповною різьбою за пропонованим методом

становила 9,0 мм, що є еквівалентом по площі болта М30 з суцільним перерізом (площа 560 мм²). Для порівняння критерію (показника) K_{1c} вибирали товщину стінки полого нарізного кріплення, яка дорівнювала більше або менше товщини δ (5 і 15 мм), що забезпечує максимальне значення в'язкості руйнування K_{1c} (характеристика тріщиностійкості). Зразки отриманого нарізного кріплення піддавали механічним випробуванням. Результати випробувань представлені в таблиці 4.6.

Для порівняння випробували кріпильний елемент з наскрізним осьовим отвором з дотриманням умови $d_3/d_{вн} = 1,4-1,5$ (відношення зовнішнього діаметру до внутрішнього). Для отримання кріплення з площею поперечного перерізу 560 мм² (болт М30 суцільного перетину) необхідно отримати болт із зовнішнім діаметром 36 мм і внутрішнім 15 отвором діаметром 24 мм, при цьому товщина стінки складатиме $\delta = 6$ мм, що менше значення, визначеного за пропонованою формулою.

Таблиця 4.6 - Механічні властивості різьбових кріпильних елементів з наскрізним осьовим отвором

№	δ , мм	σ_T , МПа	σ_B , МПа	МПа·м ^{1/2}	Клас міцності
1 ^{*)}	6,0	820	950	127	9.9
2	5,0	1010	1120	120	10.9
3	9,0	990	1080	171	10.9
4	15,0	905	1000	138	10.9

*) – кріпильний елемент виготовлений за відомою технологією

Отримані результати свідчать про те, що пропонований різьбовий кріпильний елемент, виконаний з сталі 35 у вигляді порожнього стрижня з різьбленням на зовнішній поверхні, характеризується підвищеними споживчими властивостями (міцністю), що забезпечує отримання високоміцних кріплень класу 10.9 великих типорозмірів.

4.7 Промислова апробація виробництва високоміцного кріплення за технологією багаторазових механо-термічних впливів

На підставі результатів, що були отримані на попередніх етапах були

визначенні нові технологічні параметри процесу отримання болтів класу міцності 8.8 з використанням активної і циклічної деформації, та додаткових термічних впливів які полягають в наступному. В технології виготовлення стрижневих кріпильних різьбових виробів, що включає підготовку поверхні сталевого прокату, волочіння його на заготовку необхідного розміру і подальше виготовлення виробів холодним об'ємним штампуванням запропоновано використовувати прокат зі сталі з вмістом вуглецю 0,20 ... 0,30% і марганцю 0,5 ... 1,2%, решта - залізо і неминучі домішки, волочіння здійснюють зі ступенем деформації 40 ... 60%, а після виготовлення виробів здійснюють їх стабілізуючий відпуск при температурі 300 ... 480°C протягом 0,2 ... 1,0 години. Дослідне випробування виробництва болтів за новою технологією проведено в заводських умовах.

В умовах ПАТ «Дніпрометиз» були отримані болти М6х50х1 та М8х50х1,25 з різьбою під головку шляхом штампування на автоматах АВ1918 і АВ1919Б з використанням технології штампування з однократним редуціюванням. Механічні властивості болтів виготовлених на ПАТ «Дніпрометиз» наведена у таблиці 4.7.

Як видно із наведених у таблиці 4.7 даних, використання технології штампування з однократним редуціюванням не дозволяє отримати болти класу міцності 8.8 за показниками межі міцності в наслідок прояву ефекту Баушингера. В умовах ПАТ «Дружківський метизний завод» були отримані болти М6х50х1 та М8х50х1,25 з неповною різьбою шляхом штампування на автоматах серії «LeanFX» виробництва «NationalMachinery», США з використанням технології штампування з двократним редуціюванням. Механічні властивості болтів виготовлених на ПАТ «Дружківський метизний завод» наведена у таблиці 4.8. Технологія штампування з двократним редуціюванням в наш час є найбільш поширеним методом виробництва кріпильних виробів, завдяки зменшеному зусиллю при штампуванні болтів дозволяє використовувати більш міцну заготовку та отримувати високоміцні кріпильні вироби за рахунок деформаційного зміцнення при редуціюванні

стержня болта.

Отримані результати свідчать про те, що запропонована технологія виготовлення стрижневих кріпильних різьбових виробів з межею плинності не менше 640МПа дозволяє отримувати з низьковуглецевих і низьколегованих сталей продукцію з підвищеними споживчими властивостями (високий клас міцності) при більш низькій собівартості за рахунок застосування рядових марок сталі і скорочення витрат на термічну обробку (вилучені операції відпалу заготовки та нагріву болтів під гартування з наступним швидким охолодженням). Вилучення нагріву і охолодження при гартуванні запобігає спотворенню форми кріпильних виробів по головним геометричним параметрам - прямолінійність, клас різьблення. Технологія також забезпечує зниження енерговитрат і собівартості виробництва за рахунок вибору раціональних температурно-часових параметрів стабілізуючого відпуску і регламентованого складу низьковуглецевої або низьколегованої сталі. Болти класів 6.8 та 8.8 по ДСТУ ISO 898-1:2015 можуть широко застосовуватися в машинобудуванні, автомобілебудуванні та інших галузях. Акт промислового випробування дослідної технології наведено в Додатку Б.

Таблиця 4.7 - Механічні властивості болтів отриманих на ПАТ «Дніпрометиз»

Сортамент болтів	Діаметр прокату, мм	Ступінь деформації, %	Т-ра відпуску болтів, °С	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	Клас міцності
М6	9,0	59,1	-	496	572	5.8
М6	9,0	59,1	300	519	582	5.8
М6	9,0	59,1	400	511	566	5.8
М8	11,0	49,7	-	595	724	6.8
М8	11,0	49,7	300	607	665	6.8
М8	11,0	49,7	400	637	720	6.8

Таблиця 4.8 - Механічні властивості болтів отриманих на ПАТ «Дружківський метизний завод»

Сортамент болтів	Діаметр прокату, мм	Ступінь деформації, %	Т-ра відпуску болтів, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	Клас міцності
М6	9,0	59,1	-	680	820	8.8
М6	9,0	59,1	300	785	803	8.8
М6	9,0	59,1	400	736* ¹	760	6.8
М8	11,0	49,7	-	609	722	6.8
М8	11,0	49,7	300	664* ²	705	8.8
М8	11,0	49,7	400	626	675	6.8

*) -відповідає класу 8.8 за умовної межі текучості

4.8 Висновки по розділу 4

1. Встановлено, що комплекс механічних властивостей, які визначаються на готових болтах і обточених зразках, істотно різний, причому ступінь відмінності залежить від рівня зміцнення. В цілому можна вважати, що незалежно - в досліджених межах - від відмінностей в хімічному складі сталей і способу зміцнення вплив рівня зміцнення на величину відмінностей між властивостями, обумовленими на готових болтах і обточених зразках, описується єдиними залежностями. У той же час характер цих залежностей різний для властивостей опору пластичної деформації (межа міцності і плинності) і властивостей пластичності (подовження), а також опору в'язкого руйнування (рівномірного подовження і швидкості падіння номінального напруження в інтервалі локалізованої деформації і руйнування).

2. Вперше показано і витлумачено неоднозначний вплив системи надрізів, в порівнянні з одиничним надрізом, на ефект зміцнення в надрізі при різних рівнях структурного зміцнення: в разі одиничного надрізу геометричне зміцнення в загальному фіксуємому ефекті зміцнення в надрізі виступає як співмножник зі структурним зміцненням, а в випадку системи надрізів при певному рівні структурного зміцнення вплив надрізів виявляється знеміцнючим фактором. Екстремальне вплив рівня структурного зміцнення на рівень опору

пластичної деформації слід пов'язувати з результатом інтерференції полів напружень, що виникають як у надрізів в навантажувати об'єкті, так і полів напружень, обумовлених рівнем структурного зміцнення. Вперше також формалізовано вплив різних чинників на ефект зміцнення в надрізі у вигляді рівняння, що не суперечить експериментальним даним.

3. Розроблений комплекс рекомендацій щодо шляхів вдосконалення методики здавального контролю властивостей заготовок і продукції в діючих технологіях отримання холоднодеформованих виробів масового призначення.

4. Запропонована нова методики проведення іспитів для визначення службових характеристик кріплення, таких як робота руйнування на ударний вигин та схильність до крихкого руйнування, які захищені патентами України.

5. На основі аналітичних і експериментальних досліджень встановлено, що значення рівномірної деформації при одноосьовому розтягуванні можна обґрунтовано використовувати як характеристику опору в'язкого руйнування, причому найбільш його небезпечною нестабільної стадії.

6. Показано, що рівняння $\epsilon_p = f(n)$ Консідера-Харта при використанні досить великої вибірки якісно достовірно, а кількісні відхилення від нього можна розглядати як міру неоднорідності властивостей мікрооб'ємів навантажувати об'єкта. Запропоновано комплексну характеристика опору в'язкого руйнування: значення рівномірної деформації (ϵ_p), коефіцієнта деформаційного зміцнення (n) і величини відхилення від залежності Консідера-Харта ($n-\epsilon_p$). За інших рівних умов опір грузлому руйнування зростає зі збільшенням ϵ_p , n і зменшенням ($n-\epsilon_p$).

7. При відповідному виді діаграми деформації і руйнування особливо важливе значення для зазначеної вище характеристики має величина ϵ_p , відповідна постійного зростання навантаження. Запропоновано різьбовий кріпильний елемент з наскрізним осьовим отвором, що забезпечує максимальне значення в'язкості руйнування (K_{1c}), як характеристики тріщиностійкості, та виведена формула для розрахунку оптимальної товщини стінки кріпильного виробу в залежності від межі плинності матеріалу.

4.9 Список використаних джерел в розділі 4.

У розділі 4 використані джерела [71-103]. Їх найменування представлені у загальному списку використаних джерел.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі зроблено теоретичне узагальнення і запропоновано нове рішення науково-практичної задачі, яка полягає у розробці технології виготовлення високоміцних кріпильних виробів без використання термічного зміцнення шляхом встановлення взаємозв'язку між механізмами структуроутворення та механічними властивостями низьковуглецевої нелегованої сталі після різних режимів активної та циклічної деформації у поєднанні з подальшим низькотемпературним термічним впливом. На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень зроблено наступні наукові та практичні висновки:

1. Розроблено й обґрунтовано технологію з використанням синергетики активної і циклічної деформації та фінішних термічних впливів. Технологія виробництва стрижневих кріпильних виробів (болтів, шпильок) методом деформаційно-термічних впливів дозволяє виготовляти готову продукцію без гарту останніх з властивостями міцності за межею плинності ($\sigma_{0,2}$) більше 640 МПа і за межею міцності (σ_B) більше 700 МПа, при значеннях співвідношення $\sigma_B/\sigma_{0,2} \geq 1,05$.

2. Показано, що в багатьох випадках найбільш перспективним методом зниження схильності до деформаційного старіння розглянутих об'єктів є структурний метод, який не вимагає додаткового легування, а заснований на створенні регламентованого структурного стану.

3. У даній роботі використаний саме метод зниження схильності до деформаційного старіння шляхом створення в об'єкті регламентованого структурного стану. Для досліджених холоднодеформованих болтів класу міцності 5.8 такий стан формується шляхом низькотемпературного нагріву до 400 °С після операції циклічної деформації, що призводить до зменшення накопиченої при технологічній активній холодній деформації пружної енергії та її об'ємного градієнту, перерозподілення дислокацій без суттєвого зменшення їх

щільності з формуванням однорідної дислокаційної структури дислокаційних фрагментів з квазіравновісними малоугловими границями.

4. Встановлено, що комплекс механічних властивостей, який визначається на готових болтах і обточених зразках, істотно різний, причому ступінь відмінності залежить від рівня зміцнення. В цілому можна вважати, що незалежно, в досліджених межах, від відмінностей хімічного складу сталей і способу зміцнення, вплив рівня зміцнення на величину відмінностей між властивостями, обумовленими на готових болтах і обточених зразках, описується єдиними залежностями. У той же час характер цих залежностей різний для властивостей опору пластичної деформації (межа міцності та плинності) і властивостей пластичності (подовження), а також опору в'язкого руйнування (рівномірного подовження і швидкості падіння номінальної напруги в інтервалі локалізованої деформації і руйнування).

5. Вперше показано і пояснено неоднозначний вплив системи надрізів в порівнянні з одиничним надрізом на ефект зміцнення в надрізі при різних рівнях структурного зміцнення - в разі одиничного надрізу геометричне зміцнення в загальному ефекті, що фіксується, зміцнення в надрізі виступає як співмножник зі структурним зміцненням, а в випадку системи надрізів при певному рівні структурного зміцнення вплив надрізів виявляється фактором втрати міцності. Екстремальний вплив рівня структурного зміцнення на рівень опору пластичної деформації слід пов'язувати з результатом інтерференції полів напружень, що виникають як у надрізів в навантажувати об'єкті, так і полів напружень, обумовлених рівнем структурного зміцнення. Вперше також формалізовано вплив різних чинників на ефект зміцнення в надрізі у вигляді рівняння, яке не суперечить експериментальним даним.

6. Запропоновано новий метод визначення пластичних властивостей кріпильних виробів, який дозволяє визначати характеристики міцності та пластичності на зразках одного типу. На основі аналітичних і експериментальних досліджень встановлено, що значення рівномірної

деформації при одноосьовому розтягуванні можна обґрунтовано використовувати як характеристику опору в'язкого руйнування, причому найбільш його небезпечною нестабільною стадією.

7. Показано, що рівняння $\epsilon_p = f(n)$ Консідера-Харта при використанні досить великої вибірки якісно достовірно, а кількісні відхилення від нього можна розглядати як міру неоднорідності властивостей мікрооб'ємів об'єкту, що навантажується. Запропоновано комплексну характеристику опору в'язкому руйнуванню: значення рівномірної деформації (ϵ_p), коефіцієнта деформаційного зміцнення (n) і величини відхилення від залежності Консідера-Харта ($n-\epsilon_p$). За інших рівних умов опір в'язкому руйнуванню зростає зі збільшенням ϵ_p , n і зменшенням ($n-\epsilon_p$).

8. Запропоновано різьбовий кріпильний елемент з наскрізним осьовим отвором, що забезпечує максимальне значення в'язкості руйнування (K_{1c}), як характеристики тріщиностійкості, та виведена формула для розрахунку оптимальної товщини стінки кріпильного виробу в залежності від межі плинності матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bickford John H. Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints. - NW: Taylor & Francis Group, 2013. 564 p.
2. Петриков В. Г., Власов А. П. Прогрессивные крепежные изделия. - М.: Машиностроение, 1991. 256 с.
3. Агамиров Л. В. Пособие по курсу “Сопротивление материалов”. М., 1999. 120 с.
4. Мокринский В. И. Производство болтов холодной объемной штамповкой. М.: Metallurgy, 1978. 72 с.
5. ДСТУ ISO 898-1:2015. Механічні властивості кріпильних виробів, виготовлених з вуглецевої і легованої сталі. Частина 1. Болти, гвинти і шпильки.
6. Мокринский В. И., Железков О. С. Повышение прочности, точности и стойкости крепежных изделий. *Черная металлургия: Бюл. ин-та Чермет. информация*. М., 1987. № 2. С. 19-32.
7. О. С. Железков, А. Г. Роговский, А. Н. Шугуров и др. Повышение прочности болтов. *Технический прогресс в метизном производстве*. М. Metallurgy, 1987. С. 38-43.
8. High strength steel screws and bolts, and method of production: пат. 2525709 Франція: МКИ С 22 С 38/38, опубл. 28.10.1983.
9. High-strength, quenched and tempered screw of a steel alloy and a process for its manufacture: пат. 3347224 Німечинна: МКИ С 22 С 38/38, опубл. 25.07.1985
10. Быкадоров А. Т., Хейфиц И. Л. Борсодержающая сталь для высокопрочных крепежных изделий. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1986. № 2, С. 10-12.
11. Мокринский В. И., Железков О. С. Перспективы применения новых марок стали и роторного оборудования при изготовлении крепежных изделий. *Развитие методов холодной и полугорячей объемной штамповки: Тез. докл. науч.-техн. конф. Н. Новгород*, 1990. С. 25-26.

12. Сталь: А.с. 933786 СРСР: МКИ С 22 С 38/32, опубл. 7.06.1982.
13. Низьколегована сталь для болтів з високим натягом: пат. JP1978125216 Японія, МКИ С 22 С 38/32, опубл. 1.11.1978.
14. Низьколегована сталь для болтів: пат. JP1978I 1492 Японія: МКИ С 22 С 38/32, опубл. 10.08.1978.
15. Сталь: А.с. 462880 СРСР: МКП С 22 С 39/00, опубл. 5.03.1975.
16. Сталь: А.с. 601321 СРСР: МКП С 22 С 38/12, опубл. 5.04.1978.
17. Конструкційна сталь: А.с. 605854 СРСР: МКП С 22 С 38/16, опубл. 5.05.1978.
18. Сталь: А.с. 901331 СРСР: МКИ 22 С 22 38/16, опубл. 5.04.1978.
19. Конструкційна сталь: пат. 2127769 Росія: МКП С 22 С 38/14, опубл. 20.03.1999.
20. Конструкційної сталі підвищеної прогартуємості: паї. 2127770 Росія: МКП С 22 С 38/14. опубл. 20.03.1999.
21. М. И. Борвенков, И. М. Шумилин, В. Л. Осадчий и др. Разработка технологии производства калиброванного проката и крепежа из борсодержащих марок стали, соответствующей требованиям международных стандартов. *Тез.докл. научн.-техн. конф. «Новые материалы и технологии»*, М.: 1994. С. 124.
22. В. В. Парусов, Л. М. Катель, В. И. Биба Сквозная технология производства высокопрочного крепежа из борсодержащих сталей. *Сталь*. 1996. № 1. С. 51-53.
23. О. В. Гук, А. А. Семенов Выбор металла для изготовления крепежа. *ШуГ*. №03(14). 2001. С.9-10.
24. Лякишев Н. П., Плиннер Ю. Л., Лаппо С. И. Борсодержащие стали и сплавы. М.: Металлургия, 1986. 192 с.
25. Калачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. 216 с.
26. В. И. Мокринский, Н. Н. Горин, И. К. Сорокин и др. Повышение качества высокопрочных болтов для строительных металлоконструкций.

Технология производства экономичных видов метизов. М.: Металлургия, 1986. С. 59-62.

27. Ажогин Ф. Ф., Павлов Ю. К. Коррозия и защита металлов. М.: Оборонгиз, 1962. 216 с.

28. Потак Я. М. Высокопрочные стали. М.: Металлургия, 1972. 208 с.

29. Бернштейн М.Л. Прочность стали. М.: Металлургия, 1974. 101 с.

30. М. Бобылев, В. Столяров, Д. Закиров Современные подходы к производству высокопрочного крепежа. *Метизы*. 2002. №0(01). С. 67-69.

31. Долженков И. Е. О морфологии карбидной фазы в сталях для производства метизов, крепежа и другой металлопродукции холодной пластической деформацией. *Сталь*. 2011. №11. С. 106.

32. Гуль Ю. П., Соболенко М. А., Ивченко А. В. Комплексная интенсификация сфероидизирующего отжига низкоуглеродистых сталей для холодной высадки. *Сталь*. 2012. С.44-47.

33. Штанников П. А. Ресурсосберегающие технологии подготовки сортового проката для холодной объемной штамповки. Автореферат на соискание уч. степ. канд. техн. наук. М. 2005. 22 с.

34. Парусов В. В., Черниченко В. Г., Парусов О. В., Поляков В. А., Кондрашкин В. А. Освоение производства проката для холодной высадки из стали 20Г2Р на меткомбинате “Криворожсталь”. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. №2. С. 71 – 74.

35. Угаров А. А., Бобылев М. В., Гонтарчук Е. И., Лехтман А. А. Сортовой прокат, круглый, из низколегированной стали для холодной объемной штамповки высокопрочных крепежных деталей. Патент № 2249625 RU. опуб. 10.04.2005.

36. Угаров А. А., Бобылев М. В., Гонтарчук Е. И., Лехтман А. А. Сортовой прокат, круглый, из низколегированной стали для холодной объемной штамповки высокопрочных крепежных деталей. Патент № 2249626 RU опуб. 10.04.2005.

37. Гуль Ю. П., Москаленко Л. И., Колпак В. П. Способ изготовления крепежных резьбовых изделий из низкоуглеродистых сталей. А.С. СССР № 1301855, бюл. № 13, 1987.

38. Гуль Ю.П., Колпак В. П., Ивченко А. В. Изготовление высокопрочных крепёжных изделий по технологии термомеханикотермической обработки (ТМТО) альтернатива использованию легированных и борсодержащих сталей. *Метизы*. 2007. № 2. С. 56-58.

39. Ивченко А. В., Амбражей М. Ю., Мачуская Н. Д. [и др.] Высокопрочный крепеж класса 8.8 из термомеханически упрочненной катанки. *Метизы*. 2009. №12 [55] С. 14-17.

40. Ивченко О. В., Гуль Ю. П., Долженков І. Є. та ін. Патент №65187UA. МПК F16B 35/00, C22C 38/04 Болт підвищеної міцності.; заявник й власник патента НМетАУ. опубл. 25.11.2011 р., бюл. № 22/2011.

41. Железков О. С., Баранова Л. Ф. Повышение прочности болтов за счет деформационного упрочнения. *Экономия ресурсов в производстве и потреблении металлоизделий*. М.: Металлургия, 1989, С. 32-35.

42. Паршин В. Г., Железков О. С. Применение прямого выдавливания для новых экономичных процессов холодной штамповки стержневых изделий. *Экономия металла и эффективность его использования в народном хозяйстве. Тез. докл. науч.-техн. конф. Челябинск, 1981. С. 41.*

43. Спосіб виготовлення болтів: А.с. 703214 СРСР, МКИ В 21 К 1/46, В 211 5/08, опубл. 15.12.1979.

44. Masato Kaiso, Dr. Masamichi Chiba Non Heat-treated Cold Heading Wire Rod for Bolts. *Kobe steel engineering reports*. 2002. Vol. 52. № 3. P. 52-56.

45. Яценко Ю. В., Спектор Я. И., Роговский А. Г., Лихов В. К. Производство термоупрочненной катанки и болтов класса прочности 8.8. *Сталь*. 1994. № 4. С. 65 – 67

46. ГОСТ 1050-88 Сталь качественная и высококачественная. Сортовой и фасонный прокат, калиброванная сталь. С. 30.

47. ГОСТ 10702 – 78 Прокат из качественной конструкционной нелегированной и легированной стали для холодного выдавливания и высадки. Технические условия. С.14.

48. ДСТУ ISO 6892-1:2019 Металлические материалы. Испытания на растяжение. Часть 1. Метод испытания при комнатной температуре. С. 40

49. ASTM E3 – 11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.

50. Бубнов В. А., Костенко С. Г. Механизмы упрочнения аустенитных сталей при пластическом деформировании. *Изв. вуз. Машиностроение*. 2008. № 6. С. 63 – 70.

51. Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Костерев В. Б. и др. Механизмы формирования предела текучести малоуглеродистой стали при термомеханическом упрочнении. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2011. № 3. С. 50 – 55.

52. Шалин, В.Н. Расчет упрочнения изделий при их пластической деформации. М.: Машиностроение, 1971. 192 с.

53. И. Л. Хейфец, А. Т. Быкадоров Подготовка стали 35Х к холодной высадке. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1975. №9. С. 13–14.

54. Фетисов В. П. Деформационное упрочнение углеродистой стали. М.: Мир, 2005. 200 с.

55. М. В. Сторожев, Е. А. Попов Теория обработки металлов давлением: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

56. Т. Гладман Деформационное упрочнение малоуглеродистых сталей. *Металловедение и термообработка: Экспресс-информация*. М.: ВINITI, 1970. №24. С.1-25.

57. Иводитов А. Н., Горбанев А. А. Разработка и освоение технологии производства высококачественной катанки. М.: Металлургия, 1989. 254 с.

58. А. Б. Юрьев, В. Е. Громов, Б. М. Лебошкин и др. Формирование и эволюция структурно-фазовых состояний и свойств сталей в современных

технологиях обработки давлением. Новосибирск: Наука, 2003. 347 с.

59. М. В. Чукин, Р. З. Валиев, Г. И. Рааб, Н. В. Копцева, Ю. Ю. Ефимова Исследование эволюции структуры наносталей 20 и 45 при критических степенях пластической деформации. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2007. №4. С. 89-93.

60. M. I. Danylenko, V. V. Kovylyayev, S. S. Ponomaryov, S. A. Firstov The Influence of Strain Degree on the Structural Transformations and Mechanical Properties of the Low-Carbon Steel 20. *Naukovy Notatki*. 2009. № 5. P.69.

61. А. Г. Рааб, Г. Н. Алёшин, В. И. Семёнов, Э. И. Гималтдинова Влияние различных схем деформации на изменения структуры малоуглеродистой стали. *Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения: сб. научн. трудов*. Уфа: ООО «Монография», 2013. Вып. 2 (7). С. 382-394.

62. И. Л. Перлин, М. З. Ерманок Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 447 с.

63. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.

64. Ивченко А. В. О нормировании верхних пределов характеристик прочности и требований по ударной вязкости для болтов класса прочности 5.8. *Сталь*. 2018. № 4. С. 36 – 39.

65. СТО НОСТРОЙ 2.10.76–2012. Строительные конструкции металлические. Болтовые соединения. Правила и контроль монтажа, требования к результатам работ. ЗАО "ЦНИИПСК им. Мельникова". М.: Изд-во БСТ, 2013. 57 с.

66. Бабич В. К., Гуль Ю. П., Долженков И. Е. Деформационное старение стали. М.: Металлургия, 1972. 320с.

67. Гуль Ю. П., Карнаух А. И. Дислокационная структура и хладостойкость низкоуглеродистой стали. *Изв. АН СССР. Металлы*. 1975. № 3.

С. 140 – 146.

68. Гуль Ю. П. О методике определения склонности к деформационному старению термически упрочненной низкоуглеродистой стали. *Термическое упрочнение проката*. 1970. № 37. С. 131 – 137

69. ГОСТ 7268–82. Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб. Межгосударственный стандарт. Технические условия.

70. Method for testing metals. F. Carofalo, N. J. Metuchen, G. V. Smith : Ithaca, N. Y., assignors to United States Steel Corporation, a corporation of New Jersey Filed. 1995, Dec 14. Ser. № 553,104 2. Claims (Cl. 73-15.4). United States Patent Office. 1961. June 6.

71. А. В. Ивченко, Ю. П. Гуль, М. Ю. Амбражей О правомерности определения механических свойств высокопрочных болтов путем испытания обработанных (обточенных) образцов. *«Крепёж, клеи, инструмент и ...»*, 2010. №4. С. 6-10.

72. Ю. П. Гуль, А. В. Ивченко, М. Ю. Амбражей Оценка реальной конструктивной прочности высокопрочных болтов на основе сдаточных испытаний. *Сталь*, 2011. №9. С. 42-46.

73. Yu. P. Gul', A. V. Ivchenko and M. Yu. Ambrazhei Assessment of actual structural strength of high-strength bolts on the basis of acceptance-test data. *Steel in Translation*, 2011, Vol. 41. Issue 9. P. 765– 769.

74. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Перчун Г. И. Сравнительный анализ комплекса механических свойств, полученных при испытаниях готовых болтов и обточенных образцов. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна*. 2015. №4(58) С. 132-141.

75. Херцберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. М.: Металлургия, 1989. 578 с.

76. Гуль Ю.П. Основные принципы и практика геометрически-структурного упрочнения металлоизделий. *Сталь*. 2012. №8. С. 40 – 45.
77. Роговский А.Г., Шепелева Ф.А. Механические свойства болтов из легированной стали. *Метизное производство*. 1974. №4. С. 100 – 113.
78. Матлин М.М., Манукян Д.С. Исследование влияния концентраторов напряжения на прочность болтовых соединений. *SWorld сб. науч. тр.* Одесса: SWorld. 2012. С. 423 – 427.
79. Ивченко А. В., Гуль Ю. П. Совершенствование стандартов и методов испытания арматурного проката на растяжение. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. №6. С. 125 – 128
80. Удосконалення методів визначення механічних властивостей стрижневих різьбових кріпильних виробів на розтяг. Гуль Ю. П., Ивченко О. В., Кондратенко П. В., Чмельова В.С ., Перчун Г. І.. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 6. С. 93-99.
81. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1965. 432 с.
82. Коттрелл А. Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургиздат , 1958. 268с
83. Hart E. W. Theory of the tensile test. *Acta met.* 1967. V. 15. №2. P. 351 – 355.
84. Гуль Ю. П., Рябчий М. М., Рябчий В. В., Каминская И. Ф. Эффекты упрочнения и локализации деформации при деформационном старении технического железа. *Проблемы прочности*. 1982. №10. С. 82 – 85.
85. Криштал М. М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть II Теоретические представления о механизмах неустойчивости пластической деформации. *Физическая мезомеханика*. Т. 7. 2004. №5. С. 31 – 45.
86. Moriwaki M., Ito K., Inui H., Yamaguchi M. Plastic deformation of single crystals NbSi₂ with C 40 structure. *Mat. Sci. Eng. A. Struct.* 1997. V. 240 P. 69-74.

87. S. A. Barannikova, Y. Ivanov, D. Kosinov, S. Konovalov, O. Stolboushkina, V. Gromov, Plastic Deformation Localization of Low Carbon Steel: Hydrogen Effect. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1013. P. 77-83.

88. H.S. Ho, M. Risbet, X. Feaugas, G. Moulin The effect of grain size on the localization of plastic deformation in shear bands // *Scripta Materialia*. - 2011. - Vol. 65. – pp. 998-1001.

89. Гуль Ю. П., Чмелева В. С. Вакансионное легирование металлов. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2001. №1. С. 13 – 27.

90. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. Под ред. акад. В. И. Трефилова. К.: Наукова думка, 1987. 246с.

91. Эшби М., Джонс Д. Конструкционные материалы. М.: Интеллект 2010. 672 с.

92. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: Изд-во стандартов, 1985. 62 с.

93. Щипачев А. М., Мухин В. С. Определение предела выносливости с учетом параметров качества поверхностного слоя. *Изв. вузов. Авиационная техника*, 1999, №3. С. 23–25.

94. Щипачев А. М., Мухин В. С. Модель влияния поверхностного пластического деформирования на усталостную долговечность. *Известия вузов. Авиационная техника*. 2002. №1. С. 76–77.

95. Щипачев А. М. Модели оценки долговечности при циклическом нагружении с учетом модифицированных поверхностных слоев. *Нефтегазовое дело*, 2015, т.13. №3. С. 171–175.

96. Щипачев А. М., Пояркова Е. В. Влияние усталостной повреждаемости на твердость и внутреннюю накопленную энергию металла. *Вестник УГАТУ*, 200 т.9, №6 (24) С. 152-157.

97. Щипачев А. М., Пояркова Е. В. Связь твердости и внутренней накопленной энергии с усталостной повреждаемостью металлов. *Мировое сообщество: проблемы и пути решения: Сб. науч. ст.* Уфа: Изд-во УГНТУ, 2006. № 19. С. 27–33.

98. Щипачев А. М., Наумкин Е. А., Бакусов Л. М., Пояркова Е. В. Исследование явления трансформации законов распределения скорости ультразвуковых волн при циклическом нагружении стали 09Г2С. *Мировое сообщество: проблемы и пути решения: сб. науч. статей.* – Уфа. Изд. УГНТУ, 2007. № 21. С. 64–69.

99. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на трещиностойкость при ползучести. М.:ВНИИНМАШ, 1980. 45 с.

100. МР 170-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) сварных соединений при статическом нагружении. М.:ВНИИНМАШ, 1985 52 с.

101. Патент RU №2192568, МПК7 F16B 13/00, F16B 15/00, F16B 35/00, F16B 35/04 «Кріплення», опублікований 10.11.2002 р., бюл. №31

102. Патент UA №11158, МПК 7 F16B 35/00 «Різьбовий кріпильний елемент», опублікований 25.12.1996 р., бюл. №4.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертації

1. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Перчун Г. И. Сравнительный анализ комплекса механических свойств, полученных при испытаниях готовых болтов и обточенных образцов. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна*. 2015. №4(58). С. 132-141.
2. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Чмелева В. С., Перчун Г. И. Характеристики макролокализации пластической деформации при одноосном растяжении стальных объектов и их сопротивление вязкому разрушению. *Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. ПГАСА*. 2016. № 89. С. 70-77.
3. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Чмелева В. С., Перчун Г. И. Эффект “упрочнения в надрезе” при единичном надрезе и системе надрезов в зависимости от исходного уровня прочности. *Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. ПГАСА*. 2016. № 90. С. 83-90.
4. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Моргун М. П. Методики определения и способы снижения склонности стальных изделий к деформационному старению. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 4. С. 63-67.
5. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Чмелева В. С., Перчун Г. И. Удосконалення методів визначення механічних властивостей стрижневих різьбових кріпильних виробів на розтяг. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 6. С. 93-99.
6. Ивченко О. В., Кондратенко П. В., Перчун Г. И., Гуль Ю. П., Чмельова В. С. До питання про нормування міцностних властивостей стрижневих

кріпильних виробів залежно від їх застосування і технології виготовлення. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2018. №5(112). С. 91-99.

7. Івченко О. В., Гуль Ю. П., Перчун Г. І., Чмельова В. С., Кондратенко П. В. Аналіз передбачених стандартами характеристик опору руйнуванню кріпильних виробів на прикладі болтів класу міцності 5.8 і перспективні напрямки їх вдосконалення (в порядку обговорення проблеми). *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2019. №1 (113). С. 12-20.

8. Gul Y. P., Perchun, G. I., Kondratenko, P. V., Chmeleva, V. S., Ivchenko, A. V. Heat Treatment to Slow Strain Aging in Threaded Steel Bolts. *Steel in Translation*. 2019. Т. 49. №. 2. С. 137-140. (Scopus)

9. Gul Yu., Ivchenko A., Perchun G., Chmeleva V., Kondratenko P. Basic principles of the new technology project of manufacturing steel products hardened by the cold deformation. *Scientific development and achievements: monograph*. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, N1 7GU. 2018. volume 5. P. 225-244.

10. Гуль Ю. П., Івченко А. В., Кондратенко П. В., Чмелева В. С. Сопротивление вязкому разрушению и равномерная деформация нагружаемого металлического объекта. *Коллективная монография №56 «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering*. Poland Częstochowa. 2016. №56. С. 407-410.

11. Гуль Ю. П., Кондратенко П. В., Перчун Г. И., Чмелева В. С., Івченко А. В. Новая ресурсосберегающая технология производства высокопрочного стального крепежа. *XIX International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics»*, Czestochowa. 2018. № 78. С. 96-99.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

12. Гуль Ю. П., Івченко А. В., Кондратенко П. В. Влияние функциональных надрезов (резьбы) на характеристики сопротивления пластической деформации болтов при различном уровне упрочнения. *75-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи*

розвитку залізничного транспорту». 2015. С. 357-358.

13. Гуль Ю. П., Івченко А. В., Кондратенко П. В., Якушев А. С., Коваленко В. Ф., Бурчак С. С. Влияние нагрева в процессе нанесения защитных покрытий на механические свойства крепежных изделий. *Материали IV Всеукраїнської міжвузової науково-технічної конференції*, 2016. С. 77-78.

14. Гуль Ю. П., Івченко А. В., Кондратенко П. В., Чмелева В. С. System analysis of manufacturing technologies of high-strength steel bolts. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2017: тези доповідей Дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції*, 2017. С. 12.

15. Гуль Ю. П., Перчун Г. І., Івченко О. В., Чмелева В. С., Кондратенко П. В. Нова технологія виробництва сталевих стрижневих кріпильних виробів. *II Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід»*. 2018. С. 266-268.

16. Івченко А. В., Гуль Ю. П., Перчун Г. І., Чмелева В. С., Кондратенко П. В. Анализ характеристик сопротивления разрушению крепежных изделий и предложения по их совершенствованию (в порядке обсуждения). *7th International youth conference "Perspectives of science and education"*. 2019. С. 270-281.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

17. Патент UA №103677. Різьбовий кріпильний елемент. Гуль Ю. П., Івченко О. В., Кондратенко П. В., Чмельова В. С., Перчун Г. І., u201506182 від 23.06.2015 опубл. 25.12.2015, бюл. № 24.

18. Патент UA №114904. Спосіб визначення механічних властивостей стрижневих різьбових кріпильних виробів. Гуль Ю. П., Івченко О. В., Кондратенко П. В., Чмельова В. С., Перчун Г. І., опубл. 27.03.2017 р., бюл. № 6.

19. Патент UA №107565. Спосіб визначення пластичних властивостей стрижневих різьбових кріпильних виробів. Івченко О. В., Гуль Ю. П., Семенов О. А., Чмельова В. С., Перчун Г. І., Кондратенко П. В., u201513117

від 30.12.2015, опубл. 14.06.2016, бюл. № 11.

20. Патент UA №130469. Спосіб виготовлення стрижневих кріпильних різьбових виробів. Гуль Ю.П., Кондратенко П. В., Перчун Г. І., Чмельова В. С., Івченко О. В. u201806205 від 04.06.2018, опубл. 10.12.2018, бюл. № 23.

21. Патент UA № 135230. Спосіб експрес випробування пробним навантаженням сталевих стрижневого нарізного кріпильного виробу. Івченко О. В., Рабер Л. М., Білодіденко С. В., Кондратенко П. В., Перчун Г. І. Заявлено 03.01.2019 р. Публікація 25.06.2019 р., бюл. №12.

22. Патент UA №137693 Спосіб експрес контролю сталевих стрижневих різьбових кріпильних виробів на схильність до крихкого руйнування. Івченко О. В., Рабер Л. М., Білодіденко С. В., Перчун Г. І., Гуль Ю. П., Чмельова В. С., Кондратенко П. В. u201901135 від 04.02.2019, опубл. 11.11.2019, бюл. № 21.

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

- Стародубівські читання «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування» (Дніпро, 2015, 2016, 2017 рр.);
- 75-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, 2015);
- IV Всеукраїнська міжвузова науково-технічна конференція (Суми, 2015);
- Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2017: тези доповідей Дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 2017);
- II Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» (Хельсінкі, 2018);
- 7th International youth conference "Perspectives of science and education" (Нью-Йорк, 2019).

ДОДАТОК Б
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Генеральний директор
 ЧАО «Дніпрометиз»
 Якушев О.С.
 2019 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Кондратенко П.В. за спеціальністю 05.16.01 – «Металознавство та термічна обробка металів»

Комісія в складі представників ЧАО «Дніпрометиз»: начальника технічного відділу Випанасенко В.І., начальника кріпильного цеху Щербини О.М. та представників Національної металургійної академії України (НМетАУ): проректора з наукової роботи Пройдака Ю.С., с.н.с. кафедри ТОМ Івченко О.В. склали даний акт про можливість використання результатів дисертаційної роботи Кондратенко П.В. «Удосконалення технології виробництва і методики випробувань високоміцних кріпильних виробів з вуглецевих та низьколегованих сталей» при виробництві високоміцних кріпильних виробів, що ґрунтується на підставі результатів дослідно-промислового випробування.

В кріпильному цеху ЧАО «Дніпрометиз» в 2017-2018 р.р. було проведено випробування виробництва болтів розміром М6 - М8 з використанням технології виробництва високоміцних кріпильних виробів шляхом зміцнення деформацією в процесі виготовлення болтів без проведення фінішної термічної обробки шляхом гартування та відпуску.

Для виготовлення кріплення зазначеного сортаменту в якості сировини використовувалася катанка низьковуглецевої сталі марки 20кп діаметром 9 мм (для М6) і 11 мм (для М8). При підготовці вихідної заготовки катанку піддавали волочінню із загальною деформацією 31,6-59,1%. Заготовку для болтів М6 на готовому розмірі піддавали додатковим циклічному і температурному впливу (400 °С), а заготовку для болтів М8 на проміжному розмірі (Ø 8,5 мм) додатковому температурному впливу (400 °С). Виготовлення болтів з дослідної заготовки, виготовленої за наведеною вище технологією, здійснювали в умовах ПАТ «Дружківський завод металевих виробів», а контроль механічних властивостей проводили в умовах ЧАО «Дніпрометиз» та НМетАУ згідно ДСТУ ISO 898-1:2015. Отримані результати наведені в таблиці.

Таблиця – Режими технології виробництва та механічні властивості дослідних болтів

Сортамент болтів	Діаметр прокату, мм	Ступінь деформації, %	Температура відпуску болтів, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	Клас міцності
М6	9,0	59,1	-	680	820	8.8
М6	9,0	59,1	300	785	803	8.8
М6	9,0	59,1	400	736*	760	6.8
М8	11,0	49,7	-	609	722	6.8
М8	11,0	49,7	300	664*	705	8.8
М8	11,0	49,7	400	626	675	6.8

*) – відповідає класу 8.8 по умовній межі плинності

В результаті проведених випробувань встановлено, що дослідні болти М6 повністю відповідають класу міцності 800 МПа (клас 8.8), а болти М8 відповідають класу 8.8 за характеристикою умовної межі плинності. Таким чином, показана можливість виробництва болтів класу міцності 8.8 з низьковуглецевих сталей рядового складу без проведення загартування готових виробів.

Від ЧАО «Дніпрометиз»

В.І. Випанасенко

О.М. Щербина

Від НМетАУ

Ю.С. Пройдак

О.В. Івченко



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор НМетАУ

Проф. Тващенко В.П.

« 10 » 03 2020р.

АКТ

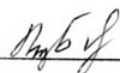
використання результатів дисертаційної роботи Кондратенка П. В.

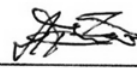
«Удосконалення технології виробництва і методики випробувань високоміцних кріпильних виробів з вуглецевих та низьколегованих сталей»

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри термічної обробки металів, професор, доктор технічних наук Дейнеко Л.М. і начальник навчального відділу Пульпінський В.Б., склали чинний акт у тому, що основні результати та методи, які було використано при написанні дисертаційної роботи аспіранта кафедри термічної обробки металів Кондратенка Павла Володимировича «Удосконалення технології виробництва і методики випробувань високоміцних кріпильних виробів з вуглецевих та низьколегованих сталей» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство», використовуються при викладанні студентам напряму 132 – механічна інженерія дисципліни «Структура і властивості», а розроблений навчальний матеріал сприяє підвищенню рівня підготовки інженерів-металознавців в галузі структуроутворення низьковуглецевих сталей.

Начальник навчального відділу
НМетАУ

Завідувач кафедри термічної обробки
металів,



 д.т.н., проф. Дейнеко Л.М.

Пульпінський В.Б.

« 10 » 03 2020р.

« 10 » 03 2020р.