

PACS numbers: 61.72.Mm, 62.20.fk, 62.20.Qp, 81.40.Cd, 81.40.Ef, 81.70.Bt, 83.50.Uv

## **Вплив температури аустенітизації з врахуванням розміру зерна на рівень регламентованих механічних властивостей конструкційних легованих криць**

В. Ю. Ольшанецький, І. М. Куніцька\*, Ю. І. Кононенко,  
А. А. Скребцов

*Національний університет «Запорізька політехніка»,  
вул. Жуковського, 64,  
69063 Запоріжжя, Україна  
\*ДП «УкрНДІспецсталь»,  
вул. Патріотична, 74-А,  
69005 Запоріжжя, Україна*

Для конструкційної термополіпшованої криці 40ХН2МА-Ш показано, що регламентовані механічні властивості матеріалу досягаються за температури аустенітизації у 850°C в процесі нагріву під гартування за рахунок формування мікроструктури з величиною вихідного аустенітного зерна номер 8–9. Встановлено, що зерно з номером 5 одержується через нагрівання вище стандартних температур гартування та не забезпечує необхідні механічні властивості криці 40ХН2МА-Ш. Одержані дані добре корелюють із відомими результатами досліджень цієї криці. Наведену в технічних умовах вимогу «величина аустенітного зерна повинна бути не крупніше номера 5» призначено для матеріалу заготовки. Ця норма має не бути використаною для конструкційних криць після кінцевого термооброблення. З урахуванням цього пропонується здавальний контроль деталей, виготовлених із криці 40ХН2МА-Ш та інших конструкційних

Corresponding author: Iryna Mykolayivna Kunyts'ka  
E-mail: [yaispector@gmail.com](mailto:yaispector@gmail.com)

*Zaporizhzhia Polytechnic National University,  
64 Zhukovsky Str., UA-69063 Zaporizhzhya, Ukraine  
\*State Enterprise Ukrainian Special Steels Institute,  
74-A Patriotychna Str., UA-69005 Zaporizhzhya, Ukraine*

Citation: V. Yu. Ol'shanets'kyi, I. M. Kunyts'ka, Yu. I. Kononenko, and A. A. Skrebtsov, Influence of Austenitization Temperature, Taking into Account Grain Size, on the Level of Regulated Mechanical Properties of Structural Alloyed Steels, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 46, No. 1: 47–59 (2024) (in Ukrainian).  
DOI: [10.15407/mfint.46.01.0047](https://doi.org/10.15407/mfint.46.01.0047)

криць, виконувати з дотриманням вимог технічних умов, а саме, випробувати механічні властивості.

**Ключові слова:** конструкційна легована криця, середньовуглецева високоякісна криця, термополіпшення, відповідальні деталі, повітряні літальні апарати, технічні умови, аустенітне зерно, механічні властивості.

As shown for structural improvable steel 40XH2MA-III, the regulated mechanical properties of the material are achieved at an austenitization temperature of 850°C in the process of heating for quenching due to the formation of a microstructure with the magnitude of the initial austenitic grain with number 8–9. As found, the grain with number 5 obtained by heating above standard quenching temperatures does not provide the necessary mechanical properties of 40XH2MA-III steel. The obtained data correlate well with the known results of studies of this steel. The requirement given in the technical specifications, namely, ‘the size of the austenitic grain should be no larger than number 5’ is intended for the material of the workpiece. This standard cannot be used for structural steels after final heat treatment. With this in mind, it is proposed to carry out the inspection of parts made of 40XH2MA-III steel and other structural steels in compliance with the requirements of technical specifications, namely, to test mechanical properties.

**Key words:** structural alloyed steel, medium-carbon high-quality steel, thermal improvement, responsible parts, aircrafts, specifications, austenitic grain, mechanical properties.

*(Отримано 27 вересня 2023 р.; остаточн. варіант — 1 листопада 2023 р.)*

## 1. ВСТУП

В сучасних умовах міжнародних відносин особливого значення набуває забезпечення обороноздатності країни, надійності експлуатації деталей в пріоритетних та стратегічних галузях промисловості, таких як атомна енергетика, авіація, транспорт, виробництво повітряних і космічних літальних апаратів.

Останніми роками на підприємствах, що виготовляють повітряні літальні та космічні апарати, освоєно виробництво гелікоптерів та відповідальних деталей гелікоптерної техніки. Такі деталі виробляються у тому числі зі криці 40XH2MA-III, згідно з технічними умовами, яких розроблено з використанням основних положень, викладених у відомих технічних умовах на заготовки (поковки, прутки гарячедеформовані) із конструкційних високоякісних криць, наприклад, ТУ 1-92-156-90, ТУ 1-801-1046-2020, ТУ 14-1-2765-79. У стані поставлення в заготовці перевіряється твердість і величина зерна. Норми до величин зерна в матеріалі заготовок деталей, як правило, розроблено шляхом використання аналогічних норм з вищезазначених ТУ на прутки, поковки, а саме: «величина зерна повинна бути не крупніше номера 5 шкал 1, 2 ГОСТ 5639-82».

Приймання деталей здійснюється за результатами випробувань механічних властивостей, твердості матеріалу.

В той же час, окремими дослідниками активно пропонується виконувати контроль величини зерна в матеріалі деталей після кінцевого термічного оброблення з використанням вимог, призначених для матеріалу заготовки. При цьому, не наводяться конструктивні аргументи та грамотні пояснення необхідності такого контролю, окрім того, що відповідальні деталі першої групи контролю повинні підлягати підвищеному контролюванню. На даний час не відомі випадки оцінювання зерна при здавальному контролюванні деталей із конструкційних криць, дане питання в літературних джерелах не розглядається. Тому, вважаємо, висвітлена проблема потребує детального дослідження.

На основі класичних уявлень металознавства про те, що механічні та експлуатаційні властивості металів визначаються внутрішньою будовою, структурою матеріалу, в даній роботі основну увагу приділяли уточненню впливу розміру зерна в залежності від температури аустенітизації на рівень регламентованих нормативно-технічною документацією механічних властивостей термополіпшуваної криці 40ХН2МА-Ш.

## 2. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

До спеціальних криць та стопів висуваються жорстко нормовані вимоги, які повинні забезпечувати технологічні та спеціальні властивості при кімнатній, підвищених та понижених температурах, в умовах високого тиску, ударних, змінних навантажень, в екстремальних умовах, наприклад, при виникненні тріщини. Актуальним завданням сучасного металознавства є одержання підвищеного комплексу фізико-механічних властивостей спеціальних криць та стопів і виробів з них [1, 2].

Ефективним способом одночасного підвищення міцності та зниження критичної температури крихкості конструкційних криць вважають зменшення розмірів аустенітного зерна і, відповідно, мартенситних кристалів (пакетів) або інших продуктів перетворення аустеніту [3–11]. В свою чергу, розмір зерна може регулюватися хемічним складом криці, режимом деформації, термічним обробленням, також в процесі суміщеного деформаційно-термічного оброблення [4–12].

В роботах В. Д. Садовського та інших дослідників [13, 14] показано, що регулювання розміру та субструктури аустенітного зерна в конструкційних крицях можливе за рахунок ефекту перекристалізації в процесі аустенітизації, яка відбувається у дві стадії: безпосередньо фазове  $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення при нагріванні і переході через критичні точки  $A_{C1}$ – $A_{C3}$  та наступна рекристалізація в аустенітній

області, які призводять до подрібнення зерна. При цьому можливим є виправлення крупнозернистої структури внаслідок заміни крупного зерна дрібним зерном.

Потрібний розмір зерна при термічному обробленні досягається, як правило, за рахунок призначення відповідних температур нагріву під гартування, які наводяться в нормативно-технічній документації — виробничих інструкціях, стандартах, технічних умовах [3, 4].

Одним з основних негативних наслідків при підвищенні температури аустенітизації  $t_A$  є значний ріст аустенітного зерна, що, по-перше, підвищує вірогідність утворення тріщин при гартуванні, а по-друге, знижує ударну в'язкість і пластичність [6, 15]. Наприклад, підвищення температури гартування в інтервалі 850–1050°C приводило до зростання розміру зерна аустеніту від  $\cong 15$  мкм до  $\cong 70$  мкм (№ 8 та № 5 згідно з ГОСТ 5639-82) та істотного пониження ударної в'язкості в криці 40ХН2МА-Ш. Оптимальне поєднання показників міцності й ударної в'язкості одержували при гартуванні з температури 850°C [5, 6, 16].

Аналіза попередніх робіт, власний досвід вивчення величини зерна в конструкційних спеціальних крицях (наприклад, 30ХГСНА, 40ХН2МА-Ш, 18Х2Н4МА-Ш, 30Х2Н2ВФМА-Ш, 42ХМ, 10Х5Г2МБ) показують, що при гартуванні зі стандартної температури 850°C в криці 40ХН2МА-Ш досягається мікроструктура дрібнодисперсного відпущеного мартенситу. Розмір зерна, як правило, становить № 7–9, чим забезпечується необхідний рівень властивостей. Суттєво підвищувались пластичність, ударна в'язкість, знижувалася схильність до крихкого руйнування в зразках з тріщиною [5, 6, 16, 17].

На нашу думку, виключно з позицій процесів перекристалізації та утворення дрібнозернистого аустеніту, які відбуваються при нагріванні до стандартних температур гартування, в діючих технічних умовах відсутні вимоги до розміру зерна в матеріалі готових виробів із конструкційних криць після їх кінцевого термічного оброблення.

Метою даної роботи було уточнення впливу температури аустенітизації з врахуванням розміру зерна на механічні властивості конструкційної термополіпшованої криці 40ХН2МА-Ш. Також, ставили за мету уточнити доцільність використання для відповідальних деталей зі криці 40ХН2МА-Ш, інших конструкційних криць наведених в технічних умовах і призначених для матеріалу заготовки вимог — «величина зерна повинна бути не крупніше номера 5 шкали 1, 2 ГОСТ 5639-82».

### 3. МАТЕРІАЛ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Вплив температури аустенітизації в процесі гартування вивчали в лабораторних умовах на матеріалі поковок промислових топлень, виготовлених зі криці 40ХН2МА-Ш. Термічне оброблення поковок у

**ТАБЛИЦЯ 1.** Режими гартування дослідних зразків із криці 40ХН2МА-Ш.  
**TABLE 1.** Quenching schedule of pilot samples of steel 40ХН2МА-Ш.

Номер режиму	Режим гартування
1	850°C, 1 година 15 хвилин, масло
2	900°C, 1 година 15 хвилин, масло
3	1000°C, 1 година 15 хвилин, масло
4	1050°C, 3 години, масло
5	1000°C, 1 година 15 хвилин, підстужування в іншій печі до 850°C, 10 хвилин, масло
6	1050°C, 1 година 15 хвилин, підстужування в іншій печі до 850°C, 10 хвилин, масло
7	1100°C, 1 година 15 хвилин, підстужування в іншій печі до 850°C, 10 хвилин, масло

стані поставлення: нормалізація, 900°C, відпуск, 670°C. Заготовки зразків, розміром 25×25×55 мм, для механічних випробувань при кімнатній температурі та наступного їх металографічного аналізу піддавали гартуванню з різних температур в інтервалі 850–1100°C та відпуску при 600°C, 1 годину 15 хв. Режими гартування наведено в табл. 1.

На кожную температуру гартування вивчали 1–3 зразка. При цьому, для стандартної температури 850°C досліджено 20–30 зразків. Статичні випробування на розтягнення проводили на циліндричних зразках. Величину *KCU* визначали при ударних випробуваннях на зразках Менаже (10×10×55 мм) за ГОСТ 9475-78.

Також досліджували величину зерна, межу міцності та ударну в'язкість матеріалу серійних деталей після термічного оброблення, проведеного згідно з технологією за стандартним режимом: гартування, 850°C, відпуск, 580°C. В роботі охоплені дані з контрольних випробувань механічних властивостей криці 40ХН2МА-Ш для 86 серійних відповідальних деталей.

Згідно з технічними умовами механічні властивості криці 40ХН2МА-Ш після термічного оброблення деталі повинні відповідати вимогам: межа міцності  $\sigma_b = 100\text{--}120 \text{ кгс/мм}^2$  (або 981–1177 МПа), *KCU* — не менше 10,0 кгс·м/см<sup>2</sup> (або не менше 98 Дж/см<sup>2</sup>). Згідно з ТУ величина зерна в матеріалі заготовки, у стані поставлення, повинна бути не крупніше номера 5.

Досліджували експериментальне термічне оброблення, проведене за режимом (три рази): нормалізація, 920°C, 1 година 15 хвилин, повітря, відпуск, 670°C, 11 година 15 хвилин, повітря.

Вивчення мікроструктури та оцінювання зерна виконували на половинках зруйнованих зразків після випробування на ударний

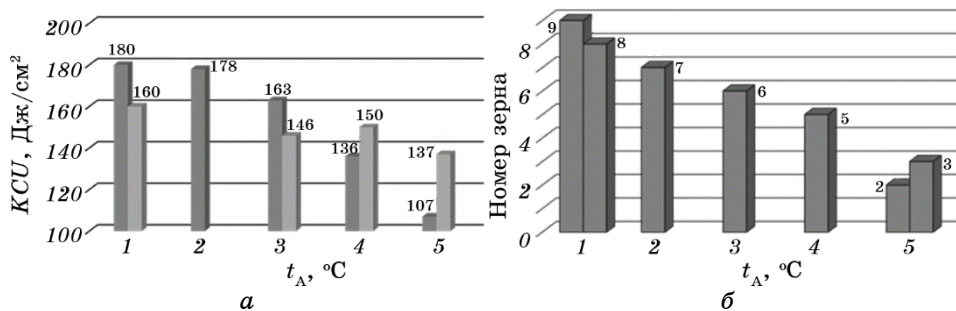
згин за допомогою оптичного мікроскопу AxioObserver D1M («Carl Zeiss») за збільшень у 100–500 разів. Для забезпечення видимої зеренної структури в криці 40ХН2МА-Ш виконували хемічне щавлення в насиченому водному розчині пікринової кислоти протягом 15–20 хв., більш докладно методика розглянута в роботі [17]. Розмір зерна оцінювали шляхом порівняння видимих під мікроскопом зерен з еталонами шкал 1, 2 стандарту ГОСТ 5639-82, з визначенням номера зерна [18]. Кожному еталону шкал відповідає середній діаметер вихідного аустенітного зерна. На поверхні щавлених мікрошліфів обирали типові зображення зеренної структури.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 1 показано залежності величини зерна та ударної в'язкості  $KCU$  від температури аустенітизації  $t_A$  в процесі нагріву під гартування. На графіках наведено найбільші та найменші значення  $KCU$ . З підвищенням температури  $t_A$  в інтервалі 850–1100°C знижується  $KCU$  та зростає номер зерна в криці 40ХН2МА-Ш.

При температурі гартування 850°C формувалася однорідна структура з розміром зерна № 8–9 ( $\cong 15$ –22 мкм). Слід зазначити, що зерна з № 5 та № 6 при 850°C не утворювалися.

Під час проведення процедури оцінювання величини зерна виявлено різнозернистість при температурах 900°C та 1000°C. В мікроструктурі з основною частиною зерен ( $\cong 70\%$ ) з номером 8–9 та № 7–8 спостерігали крупні зерна з номером 5–2. При температурі 1050°C



**Рис. 1.** Вплив температури аустенітизації  $t_A$  в процесі нагріву під гартування на ударну в'язкість (а) та номер вихідного аустенітного зерна (б) в криці 40ХН2МА-Ш: 1 — 850°C, 2 — 900°C, 3 — 1000°C, 4 — 1050°C, 5 — 1100°C.

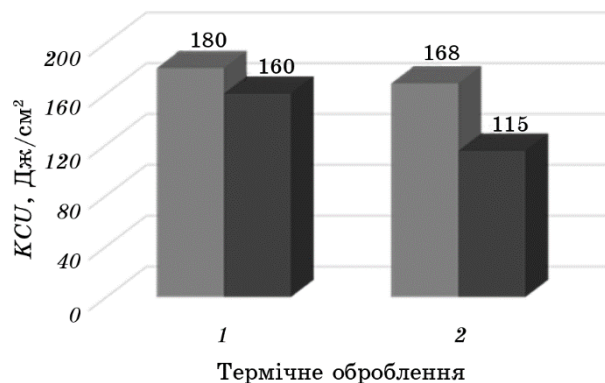
**Fig. 1.** Effect of austenitization temperature  $t_A$  in the process of heating under quenching on the impact strength (a) and the number of the original austenitic grain (b) in steel 40ХН2МА-Ш: 1—850°C, 2—900°C, 3—1000°C, 4—1050°C, 5—1100°C.

величина зерна збільшувалася до номера 5, також були присутні окремі ділянки зерен з номером 6–5. Аустенітне зерно зростало до номера 2–3 (125–177 мкм) при температурі 1100°C. У стані поставлення величина вихідного аустенітного зерна характеризувалася номером 8–9.

Нагрівом до температур 1000°C та 1050°C, з підстужуванням і гартуванням з температури 850°C одержані більш низькі значення ударної в'язкості у порівнянні із гартуванням безпосередньо з підвищених температур. При нагріві до 1000°C з підстужуванням *KCU* дорівнювала 146 Дж/см<sup>2</sup>, без підстужування — 163 Дж/см<sup>2</sup>. Такий ефект в роботі [7] пояснили пониженою мікротвердістю пластин мартенситу.

На рисунку 2 наведено рівень ударної в'язкості криці 40ХН2МА-Ш після термічного оброблення за стандартним режимом — зразків в лабораторних умовах (1) та деталей згідно з технологією (2). Основна відмінність режимів полягала у використанні різних температур відпуску, 600°C і 580°C відповідно. Після гартування та відпуску при 600°C ударна в'язкість мала значення 160–180 Дж/см<sup>2</sup>. При зниженні температури відпуску до 580°C спостерігали помітне зменшення ударної в'язкості до 115–168 Дж/см<sup>2</sup>. Гартуванням з температури 850°C та відпуском при 600°C і 580°C забезпечена межа міцності на необхідному рівні: 1060–1147 МПа та 999–1165 МПа відповідно.

Значущим результатом проведеної роботи є уточнення відомої залежності ударної в'язкості та розміру зерна від температури аустенітизації криці 40ХН2МА-Ш. Показано, що ударна в'язкість знижується із зростанням величини зерна аустеніту.



**Рис. 2.** Вплив стандартного режиму термооброблення дослідних зразків (1) та серійних деталей (2) на ударну в'язкість криці 40ХН2МА-Ш; відпуск при: 1 — 600°C, 2 — 580°C.

**Fig. 2.** Effect of standard schedule of heat treatment of the pilot samples (1) and of serial parts (2) on impact strength of steel 40ХН2МА-Ш; tempering at: 1—600°C, 2—580°C.

При температурі гартування 850°C в криці 40ХН2МА-Ш спостерігали найбільш високі значення  $KCU$ , оптимальне поєднання межі міцності та ударної в'язкості, які відповідали вимогам технічних умов до матеріялу деталі.

Очевидно, внаслідок розчинення частинок спеціальних карбідів, які вже не стримували ріст аустенітного зерна [4], за температур у 900–1000°C зафіксовано різнозернистість від 9-го до 2-го номера та пониження рівня ударної в'язкості. Утворення крупного зерна та різнозернистості в криці 40ХН2МА-Ш співпадають з результатами попередніх робіт з дослідження криці 40ХН2МА [6, 7, 14, 16], а також інших криць, наприклад, 30ХГСНА, 10Х5Г2МБ, 42CrMo4 (найближчий аналог — криця 35ХМ), 32CrMoV9 [5, 15, 19].

Спостерігали, що при 1100°C ударна в'язкість криці 40ХН2МА-Ш знижувалася у 1,2–1,5 рази у порівнянні з температурою 850°C (див. рис. 1, а). Отже, вважаємо абсолютно очікуваним падіння ударної в'язкості матеріялу деталі нижче вимог, наприклад, до значень 82 Дж/см<sup>2</sup>, при використанні високих температур гартування та відпускання при 580°C.

Слід відмітити, що в криці 40ХН2МА-Ш, виготовленої методом електрошлакового перетоплення, зниження ударної в'язкості не таке суттєве, як в роботі [6]. Разом з тим, зростання зерна до номера 5–2 та різнозернистість, одержані при підвищених температурах гартування, не забезпечать вимог ТУ до ударної в'язкості.

Взагалі, зерно з номером 5 (середній діаметр  $\cong 62$  мкм) вважається крупним [4, 7, 10]. На даний час не відома інформація про нормативно-технічну документацію із вимогами до величини зерна в матеріялі деталей із конструкційних криць після кінцевого термічного оброблення. Це пояснюється тим, що проведення випробувань регламентованих механічних властивостей під час здавального контролю згідно з ТУ вважають достатнім.

З проведеної роботи слідує ясне розуміння, що необхідні механічні властивості криці 40ХН2МА-Ш забезпечуються гартуванням з температури 850°C. Можна з упевненістю стверджувати, що зерно з номером 5 не відображує необхідний рівень механічних властивостей криці та утворюється при підвищених температурах нагріву у порівнянні із температурою 850°C [6, 7, 14, 16].

Без сумніву, використання як завищених, так і знижених норм є нерозумним та пов'язане з певним ризиком. В даному випадку, одержані результати вказують на недоцільність використання номера зерна 5 в якості норми для матеріялу деталі після кінцевого термічного оброблення. Більш того, є однозначно зрозумілим, що зерно з номером 5 не може бути повсякчасною нормою для контролювання матеріялу в різних станах — литому, деформованому, в заготовці, з кінцевим термічним обробленням, в деталі, з наноструктурою.

При цьому використання вказаних норм для заготовки є логіч-



ним та пов'язаним з тим, що в нормалізованому стані не потрібні високі значення міцності, навпаки, необхідно забезпечити покращену здатність матеріалу до механічної оброблюваності. Величина зерна з номером 5 є для цього достатньою, як і для забезпечення високої ударної в'язкості. Так, рівень ударної в'язкості після триразової нормалізації та відпускання становив 228 Дж/см<sup>2</sup>.

Слід також враховувати, що нагрів спеціальних криць під гарячу деформацію та її завершення, як правило, відбуваються при температурах вищих, ніж традиційні температури гартування, та можуть призводити до наявності в металі крупнозернистої структури. Тому очевидно, що величину зерна в заготовках контролюють для перевірки здатності металу до подрібнення зерна під дією гарячої деформації, при наступну термічному обробленні за рахунок процесів рекристалізації, перекристалізації.

Крім того, до матеріалу з нормованим розміром зерна можуть висуватися різні вимоги до механічних властивостей, що пов'язане із різною прогартуваністю виробів. Наприклад, згідно з технічними умовами ДСТУ EN 10083-3:2007 на гарячекатану і ковану металопродукцію із термополіпшуваних криць із розміром зерна № 5–8 у стані поставлення, діаметер прутків від 160 до 550 мм, крупному сорту відповідає більш низький рівень властивостей [20, 21].

Особливо необхідно відзначити випадки некоректного розуміння пункту 2.1.1.3. ГОСТ 5639, який стосується методики виявлення вихідного аустенітного зерна. Деякими дослідниками, норми до величини зерна, «не крупніше номера 5», в заготовці в нормалізованому стані з легкістю та безпідставно, на наш розсуд, переносяться на матеріал готової деталі після гартування та відпуску.

Слід зазначити, що контроль розміру зерна в заготовках гарячедеформованих або термооброблених, у стані поставлення, не суперечить стандартній методиці приготування зразка, згідно з якою аустенітне зерно виявляють в крицях з мартенситною або бейнітною структурою (пункт 2.1.1.1. ГОСТ 5639). Стандартом дозволено виконувати оцінювання металу без додаткового термічного оброблення (пункт 2.1.1.2) у разі забезпечення однофазної структури та наявності вихідного зерна аустеніту. Така структура в середньовуглецевих крицях, наприклад, 40ХН2МА-Ш, забезпечується внаслідок нормалізації, гартування з прокатного або окремого нагріву. У цьому разі криця не потребує додаткового нагрівання, а рекомендація пункту 2.1.1.3 щодо нагріву до стандартних температур гартування стосується неодноразових у стані поставлення криць.

Для уникнення невідповідності між затвердженим змістом вимог ТУ та їх реального розуміння, технічні умови повинні бути чітко сформульованими та зрозумілими на момент їх затвердження. Вважаємо, вимоги «Величина зерна сталі повинна бути не крупніше номера 5 шкали 1, 2 ГОСТ 5639-82» необхідно використовувати згід-

но з ТУ до матеріялу заготовки. Інакше, постійне змінювання розуміння сенсу ТУ призведе до знецінення процедури контролювання зерна чи іншого контрольованого параметру. При цьому, актуальним є дотримання рекомендацій щодо створення видимої зеренної структури та здійснення коректного оцінювання зерна [17, 18].

З огляду на існуючі уявлення та одержані в роботі результати, вважаємо оцінювання зерна в матеріялі деталі після кінцевого термічного оброблення некоректним та всупереч вимогам ТУ. Наполягання ж на контролюванні вказує на значні прогалини в розумінні методики контролю, впливу температури аустенітизації та розміру зерна на механічні властивості криці. Отже, використовувати для деталі вимоги, які призначені для заготовки, необґрунтовано та безперспективно.

З метою однозначного розуміння положень технічних умов щодо контрольованих параметрів, для коректного проведення процедури здавання та приймання відповідальних деталей із легованих конструкційних криць, пропонуємо чітко слідувати правилам приймання та методам випробувань, відображених в ТУ. Згідно з відомими технічними умовами 100% заготовок підлягають контролю механічних властивостей на поздовжніх зразках, вирізаних із поковок та штамповок. 100% заготовок підлягають контролю макроструктури на зламах зразків після випробувань на ударний згин. Контролю твердості підлягають: попередньо механічно оброблені заготовки після попереднього термічного оброблення по режиму нормалізації та відпуску; заготовки після зміцнювального термооброблення; заготовки під зразки згідно зі схемою ТУ.

Приймання деталей проводиться згідно з кресленнями, технічними умовами. В паспорті деталі вказуються фактичні значення механічних властивостей, одержаних при випробуваннях зразків, у тому числі і діаметри відбитків при замірі твердості за Брінеллем на заготовці деталі і заготовці під зразки для механічних випробувань.

При прийнятті рішення, за необхідності, щодо проведення контролю зерна в деталях та внесення відповідних норм в ТУ, слід скористатися результатами цієї роботи, попередніх робіт, а також провести додаткові експерименти з дослідження впливу розміру зерна на експлуатаційні властивості матеріялу, у тому числі, з використанням натурних випробувань деталей.

Взагалі-то рекомендуємо з цього питання врахувати багатолітній незалежний досвід галузевих інститутів, університетів, таких як Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут спеціальних сталей, сплавів та феросплавів» (ДП «УкрНДІспецсталь»), Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури та інших. Так, в роботах ДП «УкрНДІспецсталь» вивчені процеси формування зеренної структури під час термічного, високотемпературно-

го термомеханічного оброблення різних спеціальних криць та стопів. Результати досліджень одержано в рамках державних робіт, замовлених Мінпромполітики України, при виконанні договорів з провідними металургійними підприємствами, з ЗВО України та відображені у чисельних звітах, дисертаціях і публікаціях [1, 2, 5–7, 16, 20–22].

Таким чином, для забезпечення регламентованої якості відповідальних деталей (І групи контролю) необхідно виконувати 100% контроль механічних властивостей, твердості в матеріалі після кінцевого термічного оброблення деталю згідно з вимогами нормативно-технічної документації.

## 5. ВИСНОВКИ

1. Розвинуті уявлення з впливу температури аустенітизації в процесі нагріву під гартування та розміру зерна на механічні властивості термopolіпшуваної криці 40ХН2МА-Ш. На основі одержаних результатів та їх доброї кореляції з попередніми роботами встановлено, що регламентовані механічні властивості, найкраще поєднання ударної в'язкості та міцності криці 40ХН2МА-Ш забезпечуються гартуванням з оптимальної температури 850°C. При стандартній температурі 850°C забезпечується, як правило, вихідне зерно аустеніту з номером 8, 9 згідно з ГОСТ 5639-82.

2. Показано, що розмір зерна з номером 5 не забезпечує необхідний рівень механічних властивостей в криці 40ХН2МА-Ш та одержується при підвищених температурах нагріву у порівнянні із температурою 850°C.

3. Встановлено, що в деталях, виготовлених з конструкційних криць, наприклад, криці 40ХН2МА-Ш, не потрібно оцінювати зерно після кінцевого термічного оброблення. Зазначені в технічних умовах вимоги до величини зерна («не крупніше номера 5 шкал 1, 2 ГОСТ 5639-82») необхідно використовувати для контролювання матеріалу заготовки.

4. Контроль та приймання деталей І групи контролю, призначених для виготовлення повітряних літальних апаратів, необхідно виконувати згідно з діючими технічними умовами на 100% деталей після кінцевого термічного оброблення шляхом випробування механічних властивостей і твердості.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Я. И. Спектор, И. Н. Куницкая, А. С. Сальников, *Черные металлы*, № 2: 15 (2014).
2. Я. И. Спектор, А. В. Ноговицин, Ю. В. Артамонов, Ю. В. Яценко, И. Н. Куницкая, *Сборник трудов научно-практической конференции «Строительство, материаловедение, машиностроение»* (Днепропетровск: ПГАСА: 2008), вып. 45, ч. 4, с. 18.

3. А. П. Гуляев, *Металловедение* (Москва: Металлургия: 1986).
4. Э. Гудремон, *Специальные стали* (Москва: Металлургия: 1966), т. 2.
5. С. З. Некрасова, А. М. Сергиенко, Я. И. Спектор, Р. И. Энтин, *Физ. мет. металлостроения*, № 6: 1213 (1976).
6. М. Л. Бернштейн, Я. И. Спектор, В. Н. Дегтярев, *Известия вузов. Черная металлургия*, № 9: 170 (1980).
7. М. Л. Бернштейн, Я. И. Спектор, В. Н. Дегтярев, *Физ. мет. металлостроения*, № 1: 68 (1982).
8. D. H. Herring, *Industrial Heating*, No. 8: 20 (2005).
9. A. Gigović-Gekić, J. Duraković, B. Fakić, and H. Avdušinović, *Twelfth Research/Expert Conference with International Participation 'QUALITY 2021' (June 17–19, 2021)*, p. 23.
10. В. И. Большаков, Д. В. Лаухин, С. В. Иванцов, *Строительство, материаловедение, машиностроение*, вып. 89: 30 (2016).
11. *Материаловедение. Изучение структуры и свойств углеродистых сталей в отожженном состоянии* (Кировоград: ГЛАУ: 2008).
12. О. Х. У. Йулдашалиев, Г. Р. Жураева, З. Абдукаххаров, М. Э. Кабулов, *Science Time*, № 5: 196 (2017).
13. В. Д. Садовский, *МиТОМ*, № 6: 6 (1991).
14. Л. Ц. Заяц, Д. О. Панов, Ю. Н. Симонов и др., *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*, 13, № 2: 54 (2011).
15. В. А. Луценко, Т. Н. Голубенко, О. В. Луценко, С. Н. Шехурдин, *Литье и металлургия*, 2: 52 (2016).
16. І. М. Куницька, В. Ю. Ольшанецький, Б. А. Левін, *Збірка матеріалів XV Міжнародної науково-технічної конференції (8–9 листопада, 2022)* (Запоріжжя: Національний університет «Запорізька політехніка»: 2022), с. 94.
17. І. М. Куницька, О. Ф. Ястребова, В. Т. Рубан, В. Ю. Ольшанецький, *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, № 1: 43 (2023).
18. *Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. ГОСТ 5639-82*.
19. В. А. Луценко, Т. Н. Голубенко, О. В. Луценко, Н. А. Глазунова, *Литье и металлургия*, 3: 13 (2017).
20. А. Н. Тумко, И. Н. Куницкая, Я. И. Спектор, *XI международная научно-практическая конференция* (Запорожье: ЗНТУ: 2008), с. 141.
21. И. Н. Куницкая, *Оптимизация температурно-деформационных параметров прокатки специальных сталей с учетом их влияния на структуру и свойства* (Дис. ... канд. техн. наук) (Запорожье: 2016).
22. И. Н. Логозинский, А. Н. Тумко, А. С. Сальников, Я. И. Спектор, И. Н. Куницкая, *Сталь*, № 9: 53 (2012).

## REFERENCES

1. Ya. I. Spektor, I. N. Kunitskaya, and A. S. Sal'nikov, *Chernyye Metally*, No. 2: 15 (2014) (in Russian).
2. Ya. I. Spektor, A. V. Nogovitsin, Yu. V. Artamonov, Yu. V. Yatsenko, and I. N. Kunitskaya, *Proc. of Scientific and Practical Conference 'Stroitel'stvo, Materialovedenie, Mashinostroenie'* (Dnipropetrovsk: PGASA: 2008), Iss. 45, Pt. 4, p. 18 (in Russian).

3. A. P. Gulyaev, *Metallovedenie* [Metallurgy] (Moskva: Metallurgiya: 1986) (in Russian).
4. É. Gudremon, *Spetsial'nyye Stali* [Special Steels] (Moskva: Metallurgiya: 1966), vol. 2 (Russian translation).
5. S. Z. Nekrasova, A. M. Sergienko, Ya. I. Spektor, and R. I. Entin, *Fiz. Met. Metalloved.*, **6**, No. 6: 1213 (1976) (in Russian).
6. M. L. Bernshtein, Ya. I. Spektor, and V. N. Degtyarev, *Izvestiya Vuzov. Chernaya Metallurgiya*, No. 9: 170 (1980) (in Russian).
7. M. L. Bernshtein, Ya. I. Spektor, and V. N. Degtyarev, *Fiz. Met. Metalloved.*, **53**, No. 1: 68 (1982) (in Russian).
8. D. H. Herring, *Industrial Heating*, No. 8: 20 (2005).
9. A. Gigović-Gekić, J. Duraković, B. Fakić, and H. Avdušinović, *Twelfth Research/Expert Conference with International Participation 'QUALITY 2021' (June 17–19, 2021)*, p. 23.
10. V. I. Bol'shakov, D. V. Laukhin, and S. V. Ivantsov, *Proc. of Scientific and Practical Conference 'Stroitel'stvo, Materialovedenie, Mashinostroenie'* (Dnipro: 2016), Iss. 89, p. 30 (in Russian).
11. *Materialovedenie. Izuchenie Struktury i Svoistv Uglerodistykh Staley v Otozhzhennom Sostoyanii* [Materials Science. Study of the Structure and Properties of Carbon Steels in the Annealed State] (Kirovohrad: GLAU: 2008) (in Russian).
12. O. Kh. U. Yuldashaliev, G. R. Zhuraeva, Z. Abdukakhkharov, and M. E. Kabulov, *Science Time*, No. 5: 196 (2017) (in Russian).
13. V. D. Sadvskii, *MiTOM*, No. 6: 6 (1991) (in Russian).
14. L. Ts. Zayats, D. O. Panov, Yu. N. Simonov et al., *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Politekhnicheskogo Universiteta. Mashinostroenie, Materialovedenie*, **13**, No. 2: 54 (2011) (in Russian).
15. V. A. Lutsenko, T. N. Golubenko, O. V. Lutsenko, and S. N. Shekhurdin, *Lit'e i Metallurgiya*, **2**: 52 (2016) (in Russian).
16. I. M. Kynyts'ka, V. Yu. Ol'shanets'kyy, and B. A. Levin, *Proc. of XV Int. Scientific and Practical Conference (Nov. 8–9, 2022)* (Zaporizhzhia: National University 'Zaporizhzhia Polytechnic': 2022), p. 94 (in Ukrainian).
17. I. M. Kynyts'ka, O. F. Yastrebova, V. T. Ruban, and V. Yu. Ol'shanets'kyy, *Novi Materialy i Tekhnolohiyi v Metalurhiyi ta Mashynobuduvanni*, No. 1: 43 (2023) (in Ukrainian).
18. *Stali i Splavy. Metody Vyyavleniya i Opredeleniya Velichiny Zerna. GOST 5639-82* [Steels and Alloys. Methods for Identifying and Determining Grain Size. GOST 5639-82] (in Russian).
19. V. A. Lutsenko, T. N. Golubenko, O. V. Lutsenko, and N. A. Glazunova, *Lit'e i Metallurgiya*, **3**: 13 (2017) (in Russian).
20. A. N. Tumko, I. N. Kunitskaya, and Ya. I. Spektor, *XI Int. Scientific and Practical Conference* (Zaporizhzhia: ZNTU: 2008), p. 141 (in Russian).
21. I. N. Kunitskaya, *Optimizatsiya Temperaturno-Deformatsionnykh Parametrov Prokatki Spetsial'nykh Staley s Uchetom Ikh Vliyaniya na Strukturu i Svoistva* [Optimization of Temperature and Deformation Parameters of Rolling Special Steels, Taking into Account their Influence on the Structure and Properties] (Diss. for ... Cand. Techn. Sci.) (Zaporizhzhia: 2016) (in Russian).
22. I. N. Logozinskiy, A. N. Tumko, A. S. Sal'nikov, Ya. I. Spektor, and I. N. Kunitskaya, *Stal'*, No. 9: 53 (2012) (in Russian).