

which with a probability of 95 %, a correlation coefficient of 0.998 and an average approximation error of 0.21 % describes the diffusion process.

As a result of the research, it was established that the dissolution of carbides in austenite of hypereutectoid steels during heating is determined by the rate of carbon diffusion, austenite grain sizes, time and temperature of the process.

A mathematical model of the kinetics of dissolution of carbides in austenite of hypereutectoid steels during heating was developed, taking into account the influence of the chemical composition and temperature of the steel on the diffusion mobility of carbon and the size of the austenite grain. A comparison of the calculated and experimental values of the dissolution time of cementite-type carbides in austenite shows that there is a close correlation between them, with a probability of 95 %, a correlation coefficient of 0.974 and a error of 4.5 %.

The materials of the article can be used by scientists for further research and practitioners in the selection of materials for making tools.

Keywords: steel, chemical composition, temperature, diffusion, grain, austenite, dissolution.

Metalozn. obrobka met. 2025, vol. 31 (113), 20-30
<https://doi.org/10.15407/mom2025.01.020>

УДК 621:664: 669.01(075)

Залежність кількості аустеніту від температури при нагріванні загартованої штампової сталі 4ХЗН5МЗФ

Радченко О. К., доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
arradch@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2802-0874>

Сидорчук О. М., кандидат технічних наук, старший дослідник,
sedoroleg@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0026-7525>

Федоран Ю. О., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
yfedoran@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5300-1217>

Аскеров М. Г., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
mukafat_ask@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6611-2732>

Гогаєв К. О., член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, завідувач відділу, gogaev@ipms.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0042-1759>

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, Україна

У роботі використано результати проведеного раніше високотемпературного Х-променевого фазового аналізу загартованої штампової сталі 4ХЗН5МЗФ одержаної методом електрошлакового кокільного лиття. Було побудовано експоненціальну безмодельну

залежність кількості аустеніту від температури. Одержана, за допомогою програми Origin, залежність з досить високим коефіцієнтом детермінованості (0,99397) описує збільшення кількості аустеніту при збільшенні температури нагріву сталі в усьому інтервалі досліджених температур (від 20 до 800 °C). Коефіцієнти, що входять до цієї залежності на жаль не мають чіткого фізичного сенсу, тому була проведена спроба описати зміну кількості аустеніту за допомогою рівняння Арреніуса. За допомогою метода лінійної регресії та використання програми Excel були розраховані матеріальні константи закону Арреніуса лише для трьох верхніх точок. Було встановлено, що залежність кількості аустеніту (γ , % за мас.) гарно описується законом Арреніуса ($R^2 = 0,98397$) в інтервалі температур від 450 до 800 °C, тоді як залишкова кількість аустеніту за кімнатної температури не відповідає цій залежності. Порівняння розрахованої величини ефективної енергії активації утворення аустеніту з існуючими літературними даними (1500-450 кДж/моль для інструментальних сталей та 40 кДж/моль для заевтектоїдної борної сталі (22MnB5)) показало, що вона має досить малу величину. Мала величина розрахованої ефективної енергії активації на наш погляд пов'язана з трьома факторами, що знижують її величину: наявність залишкового аустеніту у структурі сталі після її гартування, тонкодисперсна нерівноважна структура мартенситу та низька швидкість нагрівання зразків при їх дослідженні. Встановлені закономірності зміни фазового складу щодо кількості аустеніту у загартованій сталі 4X3H5M3Ф при нагріванні в досліджуваному інтервалі температур дозволяють визначити ефективність її використання для інструменту гарячого штампування при різних робочих температурах.

Ключові слова: штампова сталь, аустеніт, нагрівання, рівняння Арреніуса, ефективна енергія активації.

За високих температур експлуатації (вище 800 °C), коли штампові сталі з високою теплостійкістю [1, 2] для виготовлення інструменту виявляються неефективними, застосовують сталі з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації (РАПЕ) [3-5]. Одержання такої сталі з використанням технології електрошлакового кокільного лиття дозволило суттєво підвищити її експлуатаційні властивості [6, 7]. Для роботи у важких температурно-силових умовах була розроблена технологія виготовлення сталі 4X3H5M3Ф [8], розроблені та оптимізовані режими її термічної обробки [9, 10, 11] та досліджено деякі властивості [12, 13]. Ця сталь гарно зарекомендувала себе при пресуванні мідно-нікелевих сплавів (типу сплаву марки МНЖ 5-1). Обов'язковою умовою ефективної роботи сталі є знаходження її в аустенітному стані за температур експлуатації. Саме тому важливо визначити закономірність утворення аустеніту при нагріві вже загартованої, підготовленої до експлуатації, сталі. Закон Арреніуса, розроблений для розрахунку швидкості хімічної реакції, тепер широко використовується у матеріалознавстві, хімії та біології [14], саме там де відбуваються температурно-ініційовані процеси: рекристалізація, деформація та інші. Цей закон також використовували для опису розрахунку кількості утвореного аустеніту та кінетики аустенізації сталі SA508 Gr.3 під час нагрівання [15]. Кількість аустеніту при нагріванні безвуглецевого залізо-хромистого сплаву (8% Cr), а також безперервного та ізотермічного перетворення роторної сталі 30Cr2Ni4MoV у процесі її аустенітизації описували моделями Джонсона-Мела та Джонсона-Мела-Аврамі заснованими на законі Арреніуса [16, 17].

Фазові перетворення

Метою роботи є встановлення залежності між кількістю аустеніту у загартованій штамповій сталі, що відповідає марочному складу 4ХЗН5МЗФ та температурою при її нагріванні до температур експлуатації зі швидкістю яка приблизно відповідає швидкості нагріву інструменту (матриці) перед початком її роботи.

Виплавку дослідної штампової сталі, що відповідала марочному складу 4ХЗН5МЗФ, здійснювали за технологією електрошлакового переплаву з кокільним литтям на установці ПАТ Рівненського науково-дослідного інституту технології машинобудування. Зразки для досліджень гартували від 1040 °С в оливі.

Для визначення кількості зворотного аустеніту в сталі, а саме такий аустеніт утворюється при нагріванні мартенситу, використовували високотемпературний Х-променевий фазовий аналіз [18, 19]. Були одержані дифрактограми за температур 20, 500, 700, 750 та 800 °С [20].

В результаті проведеного аналізу було показано, що при підвищенні температури зменшувалася кількість фази фериту і збільшувалася кількість аустеніту (табл. 1). Так за кімнатної температури кількість аустеніту у гартованій сталі складала 2,70 %. При нагріві сталі до температури 500 °С кількість аустеніту складала 9,9 %. Нагрів сталі до температури критичної точки сталі Ас1 (700 °С), призвів до збільшення кількості аустеніту до 35,17 %. В інтервалі температур часткової перекристалізації від 750 до 800 °С кількість аустеніту збільшилась від 65,61 до 96,30 %, відповідно.

Таблиця 1

Результати обрахунку дифрактограм сталі 4ХЗН5МЗФ одержаних при різних температурах

Table 1

The results of calculating the diffractograms of 4Kh3N5M3F steel obtained at different temperatures

Температура, °С	γ-Fe (аустеніт), мас. %	α-Fe, мас. %
20	2,7	97,3
500	9,9	90,1
700	35,2	64,8
750	65,6	32,8
800	96,3	2,0

Відповідно до проведених розрахунків (табл. 1) залежність кількості аустеніту в сталі від температури нагрівання в інтервалі температур від 20 до 800 °С, мала нелінійний характер близький до експоненціального. В результаті обробки експериментальних даних за допомогою програми Origin була одержана залежність кількості аустеніту (γ, мас. %) від температури нагрівання зразка t , (°С), яка мала вигляд:

$$\gamma, \% = 3,155 + 0,1314e^{\frac{(t-116)}{104}}, \quad (2)$$

Фазові перетворення

Одержана залежність (рис. 1) та формула (2) з досить високим коефіцієнтом детермінованості (0,99397) описує збільшення кількості аустеніту у загартованій сталі 4Х4Н5М3Ф при збільшенні температури її нагріву в усьому інтервалі досліджених температур (від 20 до 800 °С), але нажаль не має чіткого фізичного сенсу.

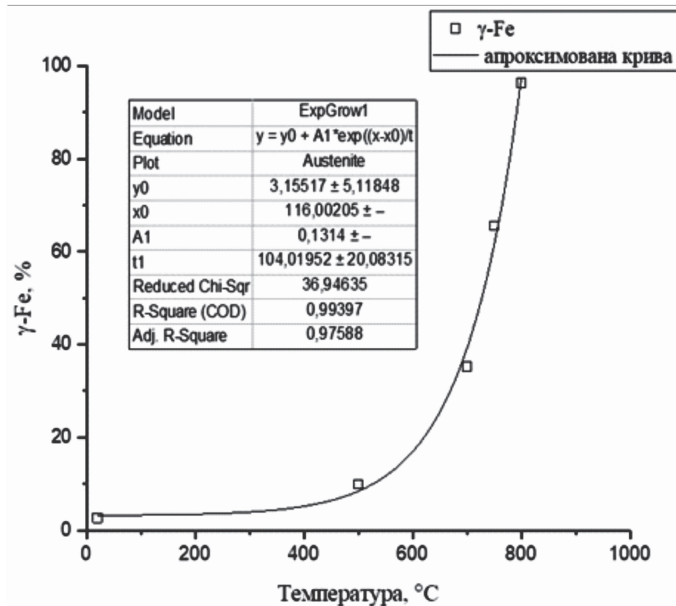


Рис. 1. Крива залежності кількості аустеніту у загартованій сталі від температури її нагріву побудована за допомогою програми Origin з нанесеними на неї експериментальними точками.

Fig. 1. The curve of the dependence of the amount of austenite in hardened steel on its heating temperature is constructed using the Origin program with experimental points plotted on it.

Був проведений аналіз можливості опису цієї залежності за допомогою закону Арреніуса, який первинно встановлював залежність константи швидкості хімічної реакції (k) від температури у градусах Кельвінах (T) за формулою (3).

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (3)$$

де A – передекспоненціальний множник реакції, який слабко залежить від температури;

E_a – енергія активації, незмінна для даної реакції, Дж/моль;

R – універсальна газова стала, 8,314 Дж/моль·К

Підставимо замість k кількість аустеніту гартованої сталі (γ , %) і одержимо наступний вираз (4).

$$\gamma, \% = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (4)$$

Для перевірки виконання закону Арреніуса було побудовано залежність $\ln(\gamma, \%)$ від зворотної величини температури нагріву (рис. 2). У разі виконання закону вона повинна описуватись прямолінійною функцією (5). Як бачимо, на графіку лише три верхні точки утворюють пряму лінію, вони відповідають температурам 973, 1023 та 1073 К. Четверта точка, що відповідає температурі 773 К, при певному припущенні також може бути віднесена до цього закону, тоді як точка, що відповідає температурі 293 К стоїть далеко від зазначеної лінії і не може бути віднесена до цього закону.

$$\ln(\gamma, \%) = \left(-\frac{E_a}{R}\right) \cdot \left(\frac{1}{T}\right) + \ln A \quad (5)$$

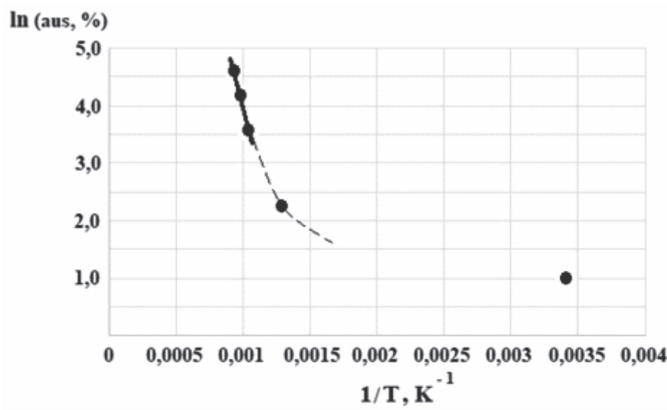


Рис. 2. Залежність $\ln(\gamma, \%)$ від зворотної величини від температури нагрівання.

Fig. 2. Dependence of $\ln(\gamma, \%)$ on the reciprocal of the heating temperature.

За допомогою метода лінійної регресії та використання програми Excel були розраховані матеріальні константи закону Арреніуса лише для трьох верхніх точок (рис. 3). Розрахунок дав величини натурального логарифму передекспоненціального множника $\ln(A)=14,423$ та ефективної

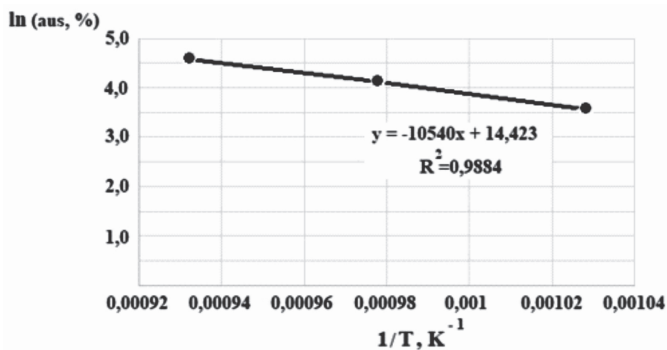


Рис. 3. Лінійна залежність $\ln(\gamma, \%)$ від зворотної величини від температури нагрівання сталі 4ХЗН5МЗФ для температур 973, 1023 та 1073 К.

Fig. 3. Linear dependence of $\ln(\gamma, \%)$ on the reciprocal of the heating temperature of 4Kh3N5M3F steel for temperatures of 973, 1023, and 1073 K.

енергії активації $E_a = 87,630$ кДж/моль. Отримана залежність (5) мала коефіцієнт детермінованості $R^2=0,988$ (рис. 3). Порівняння розрахованої величини ефективної енергії активації утворення аустеніту з існуючими літературними даними (1500-450 кДж/моль для інструментальних сталей [21, 22, 23] та 40 кДж/моль для заевтектоїдної борної сталі (22MnB5) [24]) показало, що вона має досить малу величину. Пояснити таку низьку величину енергії активації можна розглянувши структуру сталі після гартування. Мікроструктура сталі після гартування залишалася дендритною, але при більшому збільшенні дендритів у них виявляли тонкодисперсні гілки мартенситної структури. Наявність після гартування залишкового аустеніту (2,7 мас. %) та тонкодисперсного нерівноважного мартенситу може суттєво впливати на енергію активації знижуючи її. Низька швидкість нагрівання також сприяє зниженню E_a . При високих швидкостях охолодження утворення аустеніту відбувається за механізмом зсуву, що підвищує E_a тоді як за низької швидкості нагрівання перетворення відбувається за дифузійним механізмом і E_a знижується. Таким чином графік залежності кількості аустеніту від температури в інтервалі 973-1073 К сталі після гартування за температури 1040 ± 10 °С виглядає наступним чином (рис. 4) та описується залежністю (6).

$$\gamma, \% = 2 \cdot 10^6 \exp\left(-10540 \frac{1}{T}\right) \quad (6)$$

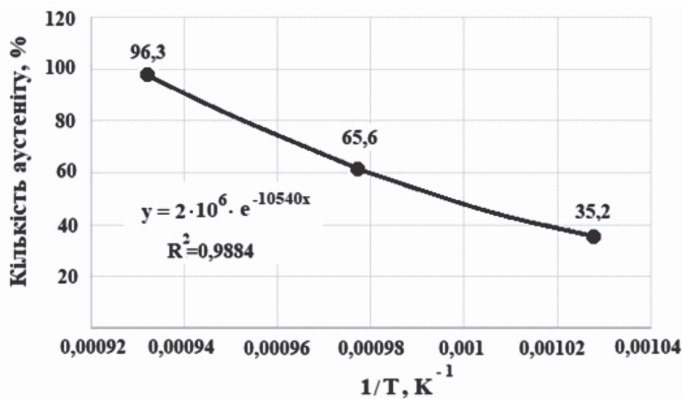


Рис. 4. Залежність кількості аустеніту від температури, що описується законом Арреніуса.

Fig. 4. Dependence of the amount of austenite on temperature, which is described by the Arrhenius law.

Висновки

1. Одержана за допомогою програми Origin залежність, яка з досить високим коефіцієнтом детермінованості (0,99397) описує збільшення кількості аустеніту у загартованій сталі 4X4H5M3Ф при збільшенні температури її нагріву в усьому інтервалі досліджених температур (від 20 до 800 °С), не має чіткого фізичного сенсу.

2. В інтервалі температур від 450 до 800 °С залежність кількості аустеніту, яка є термічно індукованою величиною, може бути описана

законом Арреніуса ($R^2 = 0,98397$), тоді як залишкова кількість аустеніту за кімнатної температури не відповідає цій залежності.

3. Мала величина розрахованої ефективної енергії активації (87,630 кДж/моль) пов'язана з наступними трьома факторами: наявністю залишкового аустеніту (2,7 мас. %), тонкодисперсною нерівноважною структурою мартенситу, який утворився при гартуванні, та низькою швидкістю нагрівання (8 °C/хв).

4. Встановлені закономірності зміни фазового складу щодо кількості аустеніту у загартованій сталі 4ХЗН5МЗФ при нагріванні в досліджуваному інтервалі температур дозволяють визначити ефективність її використання для інструменту гарячого штампування при різних робочих температурах.

Література

1. Гогаєв К.О., Сидорчук О.М., Радченко О.К. Інструментальні штампові сталі для гарячого деформування // Металознавство та обробка металів. – 2016. – № 3. – С. 18-24.
2. Позняк Л.А. Инструментальные стали. – К. : Наукова думка, 1996. – 487 с.
3. Озерский А.Д., Круглякова А.А. Штамповые стали с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации. – Л. : ЛДНТП, 1988. – 28 с.
4. Gogaev K., Sydorчук O. Die steel with regulated austenitic transformation for hot deformation of copper-nickel alloy // Science and Innovation. – 2022. – Vol. 18, No. 11. – P. 23-27.
5. Сидорчук О.М. Сталь з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації // Металознавство та обробка металів. – 2021. – № 2. – С. 47-53. <https://doi.org/10.15407/mom2021.02.047>
6. Гогаєв К.О. та ін. Штампова сталь для гарячого деформування з регульованим аустенітним перетворенням, одержана електрошлаковим литтям // Металознавство та обробка металів. – 2014. – № 1. – С. 40-45.
7. Сидорчук О.М. та ін. Литва сталь з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації, одержана електрошлаковим переплавом // Успіхи матеріалознавства. – 2020. – № 1. – С. 77-85. <https://doi.org/10.15407/materials2020.01.077>
8. Гогаєв К.О. та ін. Технологія виготовлення штампової сталі 40ХЗН5МЗФ для гарячого деформування // Програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». – К. : Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2015. – С. 669-672.
9. Гогаєв К.О. та ін. Дослідження режимів термічної обробки штампової сталі 4ХЗН5МЗФ // Современные проблемы физического материаловедения. – 2016. – Вып. 25. – С. 105-108.
10. Сидорчук О.М. та ін. Оптимізація режимів термічної обробки сталі з регульованим аустенітним перетворенням при експлуатації для гарячого деформування кольорових металів та сплавів // Матеріали ЛІІ науково-технічної конференції ВНТУ. – Вінниця, 2023. – С. 2779-2781.
11. Гогаєв К.О. та ін. Спосіб термічної обробки сталі для гарячого пресування: Пат. 94746 Україна. МПК С21D 8/00. – Опубл. 25.11.2014.
12. Сидорчук О.М. Фазово-структурний стан сталі 40ХЗН5МЗФ в процесі перекристалізації // Современные проблемы физического материаловедения. – 2013. – Вып. 22. – С. 186-188.

13. Сидорчук О.М. та ін. Структура та властивості штампової сталі для гарячого деформування кольорових металів та сплавів // Матеріали ІХ науково-практичної конференції молодих вчених України. – К. : ФТІМС НАН України, 2023. – С. 55-57.
14. Kohout J. Modified Arrhenius Equation in Materials Science, Chemistry and Biology // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26(23). – Article 7162. <https://doi.org/10.3390/molecules26237162>.
15. Luo X., Han L., Gu J. Study on austenitization kinetics of SA508Gr. 3 steel based on isoconversional method // *Metals*. – 2015. – Vol. 6(1). – Article 8. – P. 1-14. <https://doi.org/10.3390/met6010008>.
16. Chiba A. Isothermal transformation kinetics from ferrite to austenite in an Fe-8% Cr alloy // *Trans. Jpn. Inst. Met.* – 1984. – Vol. 25. – P. 523-530. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.25.523>.
17. Chen R., Gu J., Han L., Pan J. Austenization kinetics of 30Cr2Ni4MoV steel // *Trans. Mater. Heat Treat.* – 2013. – Vol. 34. – P. 170-174.
18. Esin V.A. та ін. In situ synchrotron X-ray diffraction and dilatometric study of austenite formation in a multi-component steel: Influence of initial microstructure and heating rate // *Acta Mater.* – 2014. – Vol. 80. – P. 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.07.042>.
19. Scott MacKenzie D. Measuring retained austenite // *Gear Solutions*. – 2022. – June 15. – URL: <https://gearsolutions.com/departments/hot-seat/measuring-retained-austenite>.
20. Гогаєв К.О. та ін. Структура та властивості загартованої сталі 40Х3Н5М3Ф, одержаної електрошлаковим переплавом за високих температур // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2015. – Т. 37, № 12. – С. 1653-1661. – URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/112459>. <https://doi.org/10.15407/mfint.37.12.1653>
21. Dirnfeld S.F., Korevaar B.M., Spijker F.V. The transformation of austenite in a fine-grained tool steel // *Metallurgical Transactions*. – 1974. – Vol. 5, No. 6. – P. 1437-1442. <https://doi.org/10.1007/BF02646630>
22. Kvasha A.V., D'yachenko V.S., D'yachenko S.S. Effect of grain size on the inhibition of alpha and gamma transformation in continuous heating of steel // *Met. Sci. Heat Treat.* – 1988. – Vol. 30. – P. 259-263. <https://doi.org/10.1007/BF00774575>.
23. Liu C. та ін. Kinetics of isochronal austenization in modified high Cr ferritic heat-resistant steel // *Appl. Phys. A*. – 2011. – Vol. 105. – P. 949-957. <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6517-7>.
24. Li N., Lin J., Balint D.S., Dean T.A. Modelling of austenite formation during heating in boron steel hot stamping processes // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – Vol. 237. – P. 394-401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.006>.

References

1. Gogaev, K. O., Sydorчук, O. M., & Radchenko, O. K. (2016). Tool stamping steels for hot deformation. *Metal Science and Treatment of Metals*, (3), 18-24. [in Ukrainian].
2. Poznyak, L. A. (1996). Tool steels. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian].
3. Ozersky, A. D., & Kruglyakova, A. A. (1988). Die steels with controlled austenitic transformation during operation. LDNTP. [in Russian].

4. Gogaev, K., & Sydorchuk, O. (2022). Die steel with regulated austenitic transformation for hot deformation of copper-nickel alloy. *Science and Innovation*, 18(11), 23-27. [in English].
5. Sydorchuk, O. M. (2021). Steel with controlled austenitic transformation during operation. *Metal Science and Treatment of Metals*, (2), 47-53. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mom2021.02.047>
6. Gogaev, K. O., Sydorchuk, O. M., Radchenko, O. K., Mamonova, A. A., Koval, O. Y., & Luk'yanchuk, V. V. (2014). Stamped steel for hot deformation with controlled austenitic transformation, obtained by electroslag casting. *Metallurgy and Metal Processing*, (1), 40-45. [in Ukrainian].
7. Sydorchuk, O. M., Mamonova, A. A., Luk'yanchuk, V. V., Gogaev, K. O., Radchenko, O. K., Myronyuk, L. A., Konoval, V. P., Shvedova, G. L., & Myronyuk, D. V. (2020). Cast steel with controlled austenitic transformation during operation, obtained by electroslag remelting. *Advances in Materials Science*, (1), 77-85. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/materials2020.01.077>
8. Gogaev, K. O., Radchenko, O. K., Sydorchuk, O. M., & Luk'yanchuk, V. V. (2015). Technology for manufacturing stamped steel 40Kh3N5M3F for hot deformation. In Targeted complex program of the NAS of Ukraine "Problems of resource and safety of operation of structures, buildings and machines" (pp. 669-672). Kyiv: Institute of Electric Welding named after E.O. Paton NAS of Ukraine. [in Ukrainian].
9. Gogaev, K. O. (2016). Research of heat treatment regimes of stamped steel 4Kh3N5M3F. *Modern Problems of Physical Materials Science*, (25), 105-108. [in Ukrainian].
10. Sydorchuk, O. M., Gogaev, K. O., Radchenko, O. K., Myronyuk, D. V., Avetisyan, A. I., & Ye, H. (2023). Optimization of heat treatment regimes of steel with controlled austenitic transformation during operation for hot deformation of non-ferrous metals and alloys. In Materials of the LII scientific and technical conference of the divisions of Vinnytsia National Technical University "NTKP VNTU-2023" (pp. 2779-2781). Vinnytsia, Ukraine. [in Ukrainian].
11. Gogaev, K. O., Sydorchuk, O. M., Radchenko, O. K., & Luk'yanchuk, V. V. (2014). Method of heat treatment of steel for hot pressing (Patent No. 94746, Ukraine UA, MPK S21D 8/00). [in Ukrainian].
12. Sydorchuk, O. M. (2013). Phase-structural state of steel 40Kh3N5M3F in the process of recrystallization. *Modern Problems of Physical Materials Science*, (22), 186-188. [in Ukrainian].
13. Sydorchuk, O. M., Yevych, Ya. I., Myslyvchenko, O. M., Myronyuk, D. V., & Myronyuk, L. A. (2023). Structure and properties of stamped steel for hot deformation of non-ferrous metals and alloys. In Metallic materials, their production and prospects for application in modern industry: Materials of the IX scientific and practical conference of young scientists of Ukraine (pp. 55-57). Kyiv, Ukraine. [in Ukrainian].
14. Kohout, J. (2021). Modified Arrhenius equation in materials science, chemistry and biology. *Molecules*, 26(23), 7162. <https://doi.org/10.3390/molecules26237162>
15. Luo, X., Han, L., & Gu, J. (2015). Study on austenitization kinetics of SA508 Gr. 3 steel based on isoconversional method. *Metals*, 6(1), 1-14. <https://doi.org/10.3390/met6010008>
16. Chiba, A. (1984). Isothermal transformation kinetics from ferrite to austenite in an Fe-8% Cr alloy. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 25, 523-530. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.25.523>

17. Chen, R., Gu, J., Han, L., & Pan, J. (2013). Austenization kinetics of 30Cr2Ni4MoV steel. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 34, 170-174.
18. Esin, V. A., Denand, B., Bihan, L. Q., Dehmas, M., Teixeira, J., Geandier, G., Denis, S., Sourmail, T., & Aeby-Gautier, E. (2014). In situ synchrotron X-ray diffraction and dilatometric study of austenite formation in a multi-component steel: Influence of initial microstructure and heating rate. *Acta Materialia*, 80, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.07.042>
19. MacKenzie, D. S. (2022, June 15). Measuring retained austenite. Gear Solutions. <https://gearsolutions.com/departments/hot-seat/measuring-retained-austenite>
20. Gogaev, K. O., Sydorchuk, O. M., Radchenko, O. K., Karpets, M. V., & Pyatachuk, S. G. (2015). Structure and properties of hardened steel 40Kh3N5M3F obtained by electroslog remelting at high temperatures. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 37(12), 1653-1661. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/112459>. <https://doi.org/10.15407/mfint.37.12.1653>
21. Dirnfeld, S. F., Korevaar, B. M., & Spijker, F. V. (1974). The transformation of austenite in a fine-grained tool steel. *Metallurgical Transactions*, 5(6), 1437-1442. <https://doi.org/10.1007/BF02646630>
22. Kvasha, A. V., D'yachenko, V. S., & D'yachenko, S. S. (1988). Effect of grain size on the inhibition of alpha and gamma transformation in continuous heating of steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 30, 259-263. <https://doi.org/10.1007/BF00774575>
23. Liu, C., Liu, Y., Zhang, D., et al. (2011). Kinetics of isochronal austenization in modified high Cr ferritic heat-resistant steel. *Applied Physics A*, 105, 949-957. <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6517-7>
24. Li, N., Lin, J., Balint, D. S., & Dean, T. A. (2016). Modelling of austenite formation during heating in boron steel hot stamping processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 237, 394-401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.006>

Одержано 13.02.25

Dependence of the amount of austenite on the temperature during heating of hardened die steel 4Kh3N5M3F

O. K. Radchenko, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, arradch@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2802-0874>

O. M. Sydorchuk, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, sedoroleg@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0026-7525>

Yu. O. Fedoran, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, yfedoran@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5300-1217>

M. G. Askerov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, mukafat_ask@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6611-2732>

K. O. Gogaev, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, gogaev@ipms.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0042-1759>

Frantsevich Institute for Problems of Material Science NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Summary

The study utilizes the results of a previously conducted high-temperature X-ray phase analysis of quenched die steel 4Kh3N5M3F obtained by electroslag chill casting. An exponential model-free dependence of the amount of austenite on temperature was constructed. The obtained dependence, calculated using the Origin software with a high determination coefficient (0.99397), describes the increase in the amount of austenite as the steel heating temperature rises throughout the investigated temperature range (from 20 to 800 °C). Unfortunately, the coefficients in this dependence lack a clear physical meaning, which led to an attempt to describe the change in austenite content using the Arrhenius equation. Using the linear regression method and Excel software, the material constants of the Arrhenius law were calculated only for the three highest temperature points. It was found that the dependence of the amount of austenite (in mass %) is well described by the Arrhenius law ($R^2 = 0.98397$) in the temperature range from 450 to 800 °C, while the residual austenite content at room temperature does not conform to this dependence. A comparison of the calculated effective activation energy of austenite formation with existing literature data (1500-450 kJ/mol for tool steels and 40 kJ/mol for hypereutectoid boron steel (22MnB5)) showed that the obtained value is relatively low. In our view, the low calculated effective activation energy is associated with three factors reducing its magnitude: the presence of retained austenite in the steel structure after quenching, a fine-dispersed nonequilibrium martensitic structure, and the low heating rate of the samples during the study. The established patterns of phase composition changes concerning the amount of austenite in quenched 4Kh3N5M3F steel during heating within the studied temperature range allow determining its efficiency for hot stamping tools at different operating temperatures.

Keywords: stamped steel, austenite, heating, Arrhenius equation, effective activation energy.