

УДК 620.18:669.

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.62

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 38ХНЗМФА ДЛЯ РОБОТИ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВИХ РЕЖИМАХ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Коваленко В. В.¹, Баглюк Г. А.¹, Троцан А.І.², Вербилло Д. Г.¹

¹Інститут проблем матеріалознавства НАН України

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича
Національної академії наук України

Анотація. Експлуатаційна стійкість штампового інструменту значною мірою залежить від таких інтегральних характеристик, як ударна в'язкість і теплостійкість в інтервалі температур гарячої чи теплої прокатки. У роботі проведені механічні, металографічні випробування сталі, легованої хромом і молібденом у комплексі з іншими жароміцними елементами.

Ключові слова: штамповий інструмент для гарячого деформування, механічні властивості, структурні характеристики, фрактографія зломів, хімічний склад.

Вступ

Від якості інструменту значною мірою залежить технологічний потенціал будь-якої країни, зокрема нашої, що бореться з агресором і окупантом. Дослідження механічних властивостей штампових сталей, що застосовують у роботі, визначить міцність за 20°C, яка формується під час термічного оброблення. Збільшення міцності сприяє зниженню пластичних характеристик металу, ударної в'язкості та не дозволяє отримати високі характеристики теплостійкості.

Аналіз публікацій

Сучасні сталі для штампового інструменту для гарячого деформування розроблені з метою створити необхідний комплекс експлуатаційних властивостей найменшими коштами [1–2]. Вимоги для характеристик є жорсткими та допускають подовжений ресурс роботи за циклічних навантажень ударного вигину за температури 700°C і подальше охолодження до 20°C та нижче нуля градусів (залежно від температури всередині цеху).

З літературних джерел [1] відомо про негативний вплив структурної мікронеоднорідності в сталі типу 38ХНЗМФА на її властивості. Зазначається, що комплекс факторів, зокрема технологічні середовища, навантаження, зміна температур, корозійна стійкість, впливають на зміни, що відбуваються в структурних складових сталі.

На думку авторів [2], під час використання роторної сталі для штампового інструменту легування вуглецем бажано обмежити до 0,35 % (мас.). Автори [3–11] досліджували вплив легувальних елементів на структуру та властивості подібних сталей та виявили позитивний вплив жароміцних карбідоутворювальних елементів на механічні властивості сталей.

Матеріал та методика експерименту

Для дослідження оптимальних композицій легувальних елементів у складі різноманітних типів сталей була досліджена сталь типу 38ХНЗМФА – «Базовий варіант».

Метою роботи було дослідження комплексу механічних властивостей за робочої температури від +20°C до +700±50°C та прогнозування експлуатаційної стійкості під час роботи в заданому температурному інтервалі за ударних навантажень. Важливим аспектом в дослідженнях є визначення сталі українського виробництва із найбільш стабільними властивостями за підвищеної температури. Супротив зазначених сталей процесам високотемпературної депланації штампів за ударних навантажень є найбільш актуальним питанням. Такі характеристики мають бути досягнені з врахуванням необхідності мінімально можливої теплоємності для забезпечення швидкого відводу тепла із зони контакту з виробом, що обробляється тиском.

Результати експерименту та їх обговорення

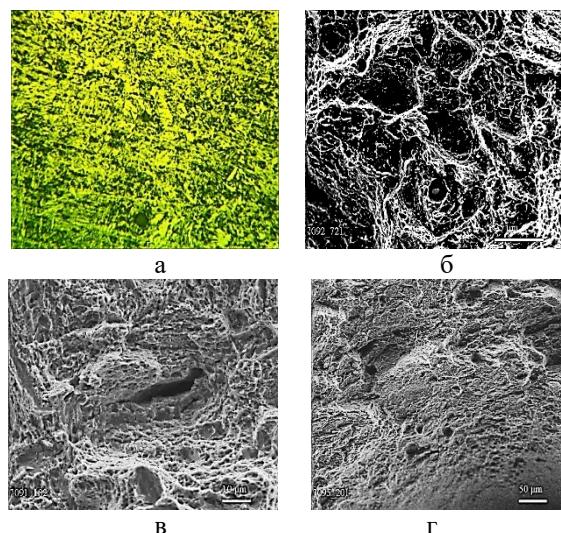
Механічні випробування проводили на установці ІТМ-100 виробництва СКТБ ІПМ НАН України. Метало- та фрактографічні дослідження структури та зломів проводили на мікроскопі JEOL SUPERPROBE 733 за напруги, що пришвидшує, 30 кВ, мікроструктуру сталі в різних режимах фіксації електронного зображення досліджували за допомогою мікроскопа Thermoscientific Axia (Чехія) з ЕДС-спектрометром з напругою, що пришвидшує, 30 кВ, растрового сканівного електронного мікроскопа VEGA3 фірми TESCAN (Чехія) з ЕДС-спектрометром із напругою, що пришвидшує, 30 кВ.

Результати механічних випробувань сталі «Базовий варіант» та вимоги стандарту до

механічних властивостей наведені в табл. 1, хімічний склад і вимоги стандарту до хімічного складу наведені в табл. 2.

Проаналізувавши результати табл. 1, можна дійти висновку про те, що високі значення міцності на розтягування сталі «Базовий варіант» не дозволяють отримати необхідні високі значення ударної в'язкості.

Сталь загартована (рис. 1, а) на високі міцносні характеристики, але сорбітний тип структури не дозволяє підтримувати високі значення міцності після серії циклічних температурно-механічних ударних навантажень з причини відпуску сталі. Хімічний склад зразків з найбільшою та найменшою ударною в'язкостями наведено в табл. 2. Сталь модифікована ітрієм та групою суміжних рідкісних і жароміцних хімічних елементів. Їхня кількість не визнається застосованими приладами (енергодисперсійними спектрометрами растрових електронних мікроскопів).



а – x400 сірі глобулі нітридів AlN; б – нітриди AlN в фасетках відриву в'язкого злому; велика (в) та дрібна (г) пористість

Рис. 1. Мікроструктура сталі «Базовий варіант»

Таблиця 1 – Результати випробувань на розтягування та ударну в'язкість модифікованої сталі за «Базовим варіантом» і сталі 38ХНЗМФА за ДСТУ7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови (Уведено вперше після скасування в Україні ГОСТ 4543-71)

	№ зразка	σ_{001} МПа	σ_{02} МПа	σ_B МПа	$\delta_{\text{рівн.}}$ %	δ %	$S_{\text{руйн.}}$ МПа	ϵ	ψ %	KCU МДж/м ²
1	1	1316,2	1421,9	1511,3	3,85	9,77	2101,1	0,563	43,07	0,682
	2	1320,3	1420,3	1506,4	3,73	9,74	2147,3	0,610	45,68	0,701
2	1	1299,0	1401,1	1500,1	4,70	12,98	2193,9	0,742	52,39	0,725
	2	1308,6	1405,5	1496,2	3,76	9,97	2085,6	0,620	46,20	0,798
3	1	1284,1	1394,7	1478,1	4,04	11,06	2101,9	0,649	47,73	0,795
	2	1285,0	1381,9	1468,2	4,28	11,89	2207,3	0,740	52,30	0,799
4	1	1299,7	386,1	1461,0	3,07	8,94	2055,3	0,594	44,78	0,802
	2	1291,5	1381,3	1461,7	4,02	11,45	2144,9	0,721	51,39	0,793
5	1	1134,7	1226,6	1309,7	4,21	10,22	1892,2	0,643	47,42	1,157
	2	1160,7	1253,4	1346,3	4,46	9,31	1822,0	0,501	39,40	1,171
Пруток, ГОСТ 4543-71 сталь 38ХНЗМФА*			1080	1180		12			50	0,78

Примітка: *Гартування – 850°C, масло, відпуск – 600°C, повітря, Ø прутка – 25 мм.

Таблиця 2 – Хімічний склад традиційної модифікованої сталі за «Базовим варіантом», % (мас.)

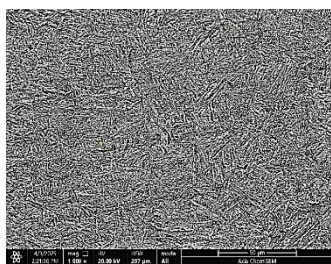
№	C	Fe	Ni	Cr	Mo	Si	V	Mn	Al
1 за KCU _{мін}	~0,38	94,55± 0,037	3,114± 0,025	1,051± 0,01	0,481± 0,004	0,339± 0,013	0,151± 0,006	0,238± 0,011	0,076± 0,021
2 за KCU _{макс}	~0,38	94,486± 0,037	3,154± 0,025	1,120± 0,011	0,485± 0,004	0,190± 0,011	0,150± 0,006	0,261± 0,011	0,058± 0,021
ДСТУ 7806:2015 [12] сталь 38ХНЗМФА	0,3- 0,4	Залишк.	3,00- 3,50	1,2-1,5	0,35- 0,45	0,17- 0,37	0,1- 0,18	0,25- 0,5	-

За ДСТУ 7806:2015 [12] в сталі може міститися до 0,025 % (мас.) сірки та до 0,025 % (мас.) фосфору, а також до 0,3 % (мас.) міді.

Основними структурними елементами, які знижують комплекс механічних властивостей сталі «Базовий варіант», є наявність включень оксидів алюмінію вздовж границь зерен (рис. 1, а, б), дрібної і великої (до 40 мкм) пористості (рис. 1 в, г) та в локальних областях підвищеної кількості сірки в сполученні із марганцем та залізом.

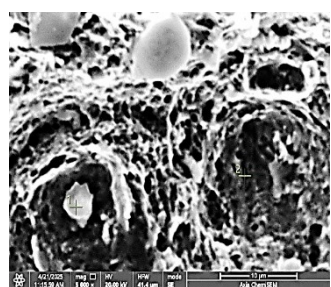
Хімічний склад місця сканування зразка сталі «Базовий варіант 1» наведено на рис. 2.

Дослідження хімічного складу нітридів алюмінію наведено на рис. 3.



Element	At. %	Wt. %	At. % Error	Wt. % Error
O	0.0	0.0	---	---
Si	0.8	0.4	0.0	0.0
P	0.0	0.0	---	---
S	0.2	0.1	0.1	0.0
V	0.2	0.1	0.0	0.0
Cr	1.4	1.3	0.0	0.0
Fe	94.0	94.4	0.2	0.2
Ni	3.3	3.5	0.1	0.1
Mo	0.1	0.2	0.0	0.1

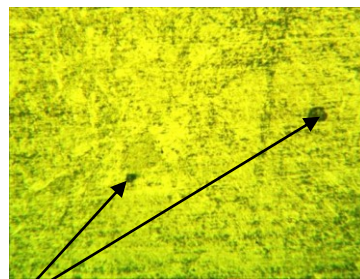
Рис. 2. Хімічний склад місця сканування сталі «Базовий варіант»



Element	Line	At. %	Wt. %	At. % Error	Wt. % Error
C	K	27.4	8.0	0.2	0.1
N	K	4.5	1.5	0.1	0.0
O	K	0.0	0.0	---	---
Al	K	0.5	0.3	0.0	0.0
Si	K	1.5	1.0	0.0	0.0
V	K	0.1	0.2	0.0	0.0
Cr	K	1.7	2.1	0.0	0.0
Fe	K	62.6	84.4	0.1	0.1
Ni	K	1.7	2.5	0.0	0.0

Рис. 3. Нітриди алюмінію в структурі сталі «Базовий варіант» (сканування хімічного складу в області 1)

Дослідження структури на оптичному мікроскопі дозволило визначити максимальні розміри нітридів алюмінію в сталі «Базовий варіант» (рис. 4)



Нітриди алюмінію AlN з max розміром 25–40 мкм

Рис. 4. Нітриди алюмінію в структурі сталі «Базовий варіант», x100

Згідно з рис. 2–4, локальна концентрація сірки в зразку сталі «Базовий варіант» дорівнює 0,1 % (мас.), що сприяє зниженню комплексу механічних властивостей та утворенню сполук MnS та FeS, а нітриди алюмінію розміром до 25–40 мкм ефективно знижують ударну в'язкість зазначеної сталі. Звичайно нітриди алюмінію мають набагато менші розміри та рівномірно розподіляються в матриці сталі, але виробники застосували особливий спосіб додавання алюмінію й азоту, внаслідок якого утворюються ланцюжки нітридів алюмінію до 25–40 мкм (рис. 4) вздовж границь зерен.

Висновки

1) під час дослідження традиційно застосованої штампової сталі для гарячого деформування 38ХНЗМФА було визначено, що її структура має ліквідаційні сегрегації легувальних елементів і домішок, які сприяють отриманню різноманітних механічних властивостей на різних ділянках металу: межу міцності в інтервалі від 1309,7 до 1511,3 МПа, ударну в'язкість КСУ від 0,682 до 1,171 МДж/м²;

2) сталь містить зайву кількість легких елементів. Наявний алюміній як нітрид. Сполуки алюмінію декорують поверхні зломів нової сталі. Зазначені легкі елементи негативно впливають на комплекс механічних властивостей. Розташування оксидів і нітридів вздовж границь зерен знижують енергоємність руйнування;

3) у модифікованій сталі за «Базовим варіантом» виявлено локальне підвищення вмісту сірки до 0,1 % (мас.), що негативно впливає не тільки на механічні властивості за +20 °С, але й створює червоноламкість за температури +700 °С. Сполуки MnS та FeS

активно лікують і переважно розташовуються вздовж границь зерен;

4) для традиційно використовуваних в Україні сталей «Базовий варіант» з метою виготовлення штампів для гарячого деформування властиві несплошності у вигляді пор або тріщин. Розміри пор у сталі за «Базовим варіантом» сягають 40 мкм.

Література

1. Колесніков В. О. Дослідження структурної мікронеоднорідності в сталі 38ХН3МФА та її вплив на властивості. Збірка матеріалів XV Міжнародної науково-технічної конференції «Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів», 08–09 листопада 2022 р. С. 82–84.
2. Балицький О. І., Колесніков В. О., Гаврилюк М. Р. Вплив модифікування сталі 38ХН3МФА на структурно-фазовий стан та продукти різання за зміни технологічних умов. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2019. Фізико-механічний інститут ім. ГВ Карпенка НАН України, № 6 С.125–131
3. ДСТУ 7806:2015. Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови (Уведено вперше зі скасуванням в Україні ГОСТ 4543-71).
4. Study on Improvement of Welding Technology and Toughening Mechanism of Zr on Weld Metal of Q960 Steel Xingyu Ai, Zhengjun Liu, Dan Wu Published: 17 February 2020. Materials 2020, 13(4), 892; <https://doi.org/10.3390/ma13040892>.
5. ТУ 3-15551-88.
6. Kang Y., Jang J. Influence of Ti on non-metallic inclusion formation and acicular ferrite nucleation in high-strength low-alloy steel weld metals. Met. Mater. Int. 2014. 20. 119–127. [Google Scholar] [CrossRef].
7. Lei X., Dong S. Phase evolution and mechanical properties of coarse-grained heat affected zone of a Cu-free high strength low alloy hull structure steel. Mater. Sci. Eng. A 2018. 718. 437–448. [Google Scholar] [CrossRef].
8. Koseki T., Thewlis G. Overview Inclusion assisted microstructure control in C-Mn and low alloy steel welds. Mater. Sci. Technol. Lond. 2005. 21. 867–879 [Google Scholar] [CrossRef]
9. A-rong Z. L. Influence of Ti on Weld Microstructure and Mechanical Properties in Large Heat Input Welding of High Strength Low Alloy Steels. Metall. Met. Work. 2015. 22. 431–437 [Google Scholar] [CrossRef].
10. Wang M. Secondary Precipitation Behavior of Nitride in the Electro-slag Remelted Structure of Alloy 690 M.Wang, Chen, B., Hao, XC et al. Acta Metall. Sin (Engl. Let.) 30. 771–780 (2017). <http://doi.org/10.1007/s40195-017-0541-3>.
11. Developing fuel cladding Fe-25Cr-22Ni stainless steels with high microstructural stabilities via Mo/Nb/Ti/Ta/W alloying D. H. Wen a, Q. Wang

a, B. B. Jiang a, C. Zhang a, X. N. Li a, G. Q. Chen a, R. Tang b, R. Q. Zhang b, C. Dong a, P. K. Liaw c Materials Science and Engineering: A, Volume 719. 14 March 2018. Pages 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.020>.

12. Comparison of H₂S high-temperature corrosion characteristics of three kinds of low-alloy and heat-resistant-steel tubes, Ming Qin, Hang Su, Mingqi Yan Corrosion Engineering, Science and Technology: The International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control. Sage Journals Volume 56, Issue <https://doi.org/10.1080/1478422X.2020.1860730>

References

1. Kolesnikov, V. O. (2022). Doslidzhennya strukturnoyi mikroneodnorodnosti v stali 38KhN3MFA ta yiyi vplyv na vlastyivosti. Zbirka materialiv KhVMizhnarodnoyi naukovy-tekhnichnoyi konferentsiyi 08–09 lystopada. Novi stali ta splavy i metody yikh obroblyennya dlya pidvyshchennya nadiynosti ta dovhovichnosti vyrobiv. S.82–84.
2. Balytskyi, O. I., Kolesnikov, V. O., Havrylyuk, M. R. (2019). Vplyv modyfikuvannya stali 38KhN3MFA na strukturno-fazovyy stan ta produkty rizannya za zminy tekhnolohichnykh umov. Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv Fyzyko-mekhanichnyy instytut im. HV Karpenka NAN Ukrayiny, № 6- S.125-131
3. DSTU 7806:2015. Prokat iz lehovanoyi konstruktysynoyi stali. Tekhnichni umovy (Uvedeno vpe-rshe iz skasuvanniam v Ukrayini HOST 4543–71).
4. Study on Improvement of Welding Technology and Toughening Mechanism of Zr on Weld Metal of. Q960 Steel Xingyu Ai, Zhengjun Liu, Dan Wu Published: 17 February 2020, Materials 2020, 13(4), 892; <https://doi.org/10.3390/ma13040892>.
5. ТУ 3-15551-88.
6. Kang, Y., Jang, J. (2014). Influence of Ti on non-metallic inclusion formation and acicular ferrite nucleation in high-strength low-alloy steel weld metals. Met. Mater. Int. 20, 119–127 [Google Scholar] [CrossRef].
7. Lei, X., Dong, S. (2018). Phase evolution and mechanical properties of coarse-grained heat affected zone of a Cu-free high strength low alloy hull structure steel. Mater. Sci. Eng. 718, 437–448 [Google Scholar] [CrossRef].
8. Koseki, T., Thewlis, G. (2005). Overview Inclusion assisted microstructure control in C-Mn and low alloy steel welds. Mater. Sci. Technol. Lond. 21, 867–879 [Google Scholar] [CrossRef]
9. A-rong, Z. L. (2015). Influence of Ti on Weld Microstructure and Mechanical Properties in Large Heat Input Welding of High Strength Low Alloy Steels. Metall. Met. Work. 22, 431–437 [Google Scholar] [CrossRef].
10. Wang, M. (2017). Secondary Precipitation Behavior of Nitride in the Electro-slag Remelted Structure of Alloy 690 M.Wang, Chen, B., Hao,

- XC et al. Acta Metall. Sin (Engl. Let.) 30, 771–780, <http://doi.org/10.1007/s40195-017-0541-3>.
11. Developing fuel cladding Fe-25Cr-22Ni stainless steels with high microstructural stabilities via Mo/Nb/Ti/Ta/W alloying D.H. Wen a, Q. Wang a, B.B. Jiang a, C. Zhang a, X.N. Li a, G.Q. Chen a, R. Tang b, R.Q. Zhang b, C. Dong a, P.K. Liaw c Materials Science and Engineering: A, Volume 719, 14 March 2018, Pages 27–42; <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.020>
 12. Comparison of H₂S high-temperature corrosion characteristics of three kinds of low-alloy and heat-resistant-steel tubes, Ming Qin, Hang Su, Minggu Yan Corrosion Engineering, Science and Technology: The International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control. Sage-Journals Volume 56, Issue <https://doi.org/10.1080/1478422X.2020.1860730>.

Коваленко Валентина Володимирівна¹, старший науковий співробітник, канд. тех. наук, vkovdp@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1196-7730>

Баглюк Геннадій Анатолійович¹, член-коресподент НАН України, доктор технічних наук, професор, директор інституту, gbag@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2392-2687>

Троцан Анатолій Іванович², професор, доктор технічних наук, головний науковий співробітник, don1945@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1435-5377>

Вербило Дмитро Григорійович¹, к.т.н., старший науковий співробітник відділу фазових перетворень ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України d.verbylo@ipms.kyiv.ua,
orcid.org/0000-0002-4375-7172,

¹Інститут проблем матеріалознавства НАН України, вул. Омеляна Пріцака, 3, м. Київ, 03142, Україна,

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, Київ, Україна.

Features of structural formation and properties of 38CrNi3MoV steel for operation in extreme temperature-force regime of cyclic loads

Problem The work presents studies of the mechanical characteristics and structure of the steel for hot deformation. The quality of the tool determines the technical level of the country, and therefore the choice of steel grade and method of its production for the tool, especially in wartime, is decisive for successful military actions in the defense of Ukraine.

Goal The purpose of the work is to determine the quality of 38KhN3MFA steel and the feasibility of its use for hot-deforming stamping tools. **Methodology**

study of the mechanical characteristics and structure of steel was carried out using the ITM-100 installation manufactured by the SKTB IPM NAS of Ukraine, optical and raster electron scanning microscopes.

Results The result of the work is the determination of the characteristics of strength, plasticity and impact toughness of KCU at a temperature of 20 °C. These characteristics are heterogeneous, the tensile strength varies in the range from 1309.7 to 1511.3 MPa, the impact toughness of KCU - from 0.682 to 1.171 MJ/m², which does not meet the requirements for the operation of the die tool for hot deformation. Studies of the structural state of steel type 38KhN3MFA showed the presence of aluminum nitrides, an increased amount of sulfur in combination with manganese and iron, as well as the presence of porosity. These defects are located mainly along grain boundaries and initiate a decrease in fracture energy under dynamic loading on impact yielding. **Originality** The scientific novelty lies in the fact that such comprehensive studies of steels for hot deformation have revealed the unsuitability of using dies made of steel type 38KhN3MFA for operation in hot deformation conditions. **Practical value.** The practical significance determines the need to replace not only the steel grade, but also the technology of its production to reduce the number of harmful non-metallic inclusions that reduce the complex of mechanical characteristics. In Ukraine, there are developments of steels for the operating conditions of die tools for hot deformation. These steels have increased impact toughness, wear resistance, corrosion resistance and increased service life. The use of new steels will also reduce the weight of the tool and rolling accuracy.

Key words: hot forming die tool, mechanical properties, structural characteristics, fracture fractography, chemical composition.

Bahlyuk Gennady Anatoliyovych¹, Corresponding Member of the Academy of Sciences of Ukraine, gbag@ukr.net, orcid.org/0000-0002-3305-8896.

Kovalenko Valentyna Volodymyrivna¹, Ph.D., Senior Researcher, tel. +38 0504890772, vkovdp@gmail.com,
orcid.org/0000-0002-1196-7730

Trotsan Anatoliy Ivanovich², Dr. Sc. in Engineering, Head. Researcher, don1945@ukr.net,
orcid.org/0000-0002-1435-5377

Dr. Dmytro Verbylo¹, Senior Research Associate, d.verbylo@ipms.kyiv.ua,
orcid.org/0000-0002-4375-7172;

¹Institute for Problems of Materials Science NAS of Ukraine, 03142, Ukraine, Kyiv, Omelyana Pritsaka St., 3.

²Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine