

Потенціал застосування надлегких сталей для виробництва елементів броні військової техніки

The potential of lightweight steels application for the production of armor elements for military technique

Михайло Ворон^A

Corresponding author: к.тех.н., старший дослідник, заст. зав. відділу, e-mail: mihail.voron@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0804-9496

Mykhailo Voron^A

Corresponding author: Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Department, e-mail: mihail.voron@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0804-9496

Юлія Скоробагатко^A

к.тех.н., старший дослідник, старший науковий співробітник, e-mail: yulka.ukr@gmail.com, ORCID 0000-0002-1724-9895

Yuliia Skorobagatko^A

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: yulka.ukr@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1724-9895

Андрій Тимошенко^A

к.тех.н., старший дослідник, старший науковий співробітник, e-mail: marschal@i.ua, ORCID: 0000-0003-4038-1744

Andrii Tymoshenko^A

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: marschal@i.ua, ORCID: 0000-0003-4038-1744

Анастасія Семенко^A

к.тех.н., старший дослідник, старший науковий співробітник, e-mail: semenko.au@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0448-1636

Anastasiia Semenko^A

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: semenko.au@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0448-1636

Сергій Шваб^B

к.тех.н., старший дослідник, старший науковий співробітник, e-mail: serg.schwab@gmail.com, ORCID 0000-0002-4627-9786

Serhiy Schwab^B

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: serg.schwab@gmail.com, ORCID 0000-0002-4627-9786

Олексій Смірнов^A

д-р.техн.наук, проф., зав. відділу, e-mail: stalevoz@i.ua, ORCID: 0000-0001-5247-3908

Oleksiy Smirnov^A

Dr. Sci.(Engin.), Professor, Head of the Department; e-mail: stalevoz@i.ua, ORCID: 0000-0001-5247-3908

^A Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ, Україна

^B Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

^A Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

^B E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: October 6, 2024 | Revised: October 20, 2024 | Accepted: October 31, 2024

DOI: 10.33445/sds.2024.14.5.10

Мета роботи: Проведення аналізу хімічного складу і властивостей сучасних сталей для виготовлення елементів бронезахисту військової техніки з надлегкими сталями в контексті пошуку нових матеріалів, які можуть зменшувати масу засобів озброєння та захисту.

Метод дослідження: аналіз, експертна оцінка.

Результати дослідження: Показано актуальність застосування матеріалів з низькою, по відношенню до звичайних сталей, густиною для виробництва елементів бронезахисту. Проведено порівняльний аналіз сталей, які використовуються у виробництві броні та вказано на потенційну технологічну і економічну доцільність використання з цією метою надлегких сталей.

Теоретична цінність дослідження: Запропоновано і обґрунтовано використання інноваційних матеріалів для потреб створення і модернізації військової техніки, зокрема для виробництва елементів бронезахисту, що може сприяти покращенню її тактико-технічних характеристик.

Практична цінність дослідження: Проведено коротке системне порівняння складу і властивостей найбільш відомих і надійних марок броньових сталей з перспективними надлегкими сталями, які мають схожі механічні та експлуатаційні характеристики. Описано технологічні прийоми для підвищення комплексу властивостей та потенціалу надлегких сталей для виготовлення бронезахисту військової техніки.

Purpose: Providing an analysis of the chemical composition and properties of modern steels for the manufacture of armor protection elements of military equipment with ultra-light steels in the context of searching a new materials that can reduce weight of weaponry and defense technique.

Method: analysis, expert assessment.

Findings: The relevance of using materials with a low density compared to ordinary steels for the production of armor protection elements is shown. A comparative analysis of steels used in the production of armor was carried out and the potential technological and economic feasibility of using lightweight steels for this purpose was indicated.

Theoretical implications: The use of innovative materials for the needs of creating and modernizing military equipment is proposed and justified, in particular for the production of armor protection elements, which can contribute to the improvement of its tactical and technical characteristics.

Practical implications: A brief systematic comparison between most well-known and reliable grades of armor steels and promising lightweight steels, which have similar mechanical and operational characteristics, was carried out. Technological methods for increasing the complex of properties and potential of lightweight steels for the production of armor protection of military technique are described.

Value: The study is aimed to draw an attention to the possibilities of large-scale modernization of already existing and creation of

Цінність дослідження: Дослідження покликане привернути увагу до можливостей масштабної модернізації існуючих та створення нових зразків військової техніки за рахунок застосування нових матеріалів.

Майбутні дослідження: Буде здійснено пошук партнерів для практичного впровадження наявних розробок авторів і проведення експлуатаційних та балістичних випробувань.

Тип статті: Теоретично-експериментальний.

new military equipment samples by using new innovative materials.

Future research: The search for partners will be carried out for the practical implementation of the authors' existing developments and providing operational and ballistic tests.

Papertype: Theoretical–experimental.

Ключові слова: оборонно-промисловий комплекс, нові матеріали для військової техніки, броня, модернізація, надлегкі сталі.

Key words: military-industrial complex, new materials for military technique, armor, modernization, lightweight steels.

Вступ

Створення і застосування нових конструкційних матеріалів з низькою густиною відноситься до числа найважливіших задач розвитку багатьох технологічних напрямків і є особливо важливим для оборонно-промислового комплексу. Зменшення маси елементів озброєння та військової техніки дозволяє підвищити мобільність і маневреність, а також зменшити габарити, або збільшити допустимі навантаження для зразків легко- та важкоброньованої наземної техніки, літаків, катерів, безпілотних та безекіпажних засобів, елементів індивідуального захисту, тощо. Перелічені переваги зниженої густини конструкційних матеріалів у ВПК використовуються та розвиваються багато десятиліть і залишаються в переліку постійних тенденцій удосконалення озброєння та військової техніки [1, 2].

Такі відомі світові лідери з виробництва озброєння, як Lockheed Martin, Boeing, BAЕ systems, Leonardo, Airbus, Dassault, Rheinmetall AG та Ingalls постійно розвивають і збільшують використання легких матеріалів для своєї техніки [3]. Класичне застосування високоміцних алюмінієвих сплавів та полімерів поступово збільшується для виробництва легкоброньованої техніки та безпілотних літальних апаратів. Для більш важкої техніки, яка потребує підвищення маневреності та одночасного збереження високого рівня захисту (танки, БМП, БТР) постійно зростає потреба в збільшенні відсотка використання легких та надміцних сталей на заміну класичних конструкційних та броньових залізо-вуглецевих сплавів [4].

Теоретичні основи дослідження

В якості відомого і досить контрастного прикладу використання легких матеріалів для виробництва елементів броні військової техніки варто навести алюмінієві сплави. Їх застосовують, починаючи з часів В'єтнамської війни, що показано на прикладі легендарного бронетранспортера М113. Він виготовлявся майже п'ятдесят років, а використовується понад шістдесят, має багато сучасних модернізацій та аналогів. Багато в чому така популярність та ефективність пов'язані саме з використанням алюмінієвої броні, для якої було застосовано сплави на основі системи Al-Mg-Mn. Вони забезпечували надійний захист від осколкових уражень та стрілецької зброї звичайних калібрів. Основними марками алюмінієвих сплавів для виробництва елементів броні є 2024, 2519, 5059, 6061, 7039, 7075 та 2139 [2, 5].

Логічним продовженням процесу створення легких матеріалів для бронезахисту повинні були стати сплави на основі титану та магнію. Тим не менш, титан може бути придатним лише в якості частини багатошарової композитної броні та як структурний екран для захисту від куль. Низькі балістичні характеристики титану пов'язані з утворенням адіабатичного розтріскування при взаємодії з балістичним фактором ураження, що викликає розшарування матеріалу та утворення сколів. Однією з причин такого ефекту є тип кристалічної ґратки титану (гексагональна компактна). Таку саму ґратку має і магній, тому він та його сплави також поки не використовуються в якості елементів броні. Перспективи його використання, при цьому, є досить високими, проте впровадження вимагає проведення великої кількості досліджень та розробки спеціальних технологій деформування [5].

Відповідно, запит на максимальне зменшення маси військової техніки при збереженні її високого рівня захищеності має велику актуальність, а розробки в цьому напрямку постійно продовжуються.

Постановка проблеми

Метою статті є експертний аналіз придатності нового типу надлегких сталей для виробництва елементів броні військової техніки та порівняння їх характеристик з деякими найбільш відомими і надійними марками броньових сталей, які використовуються в Україні та світі.

Результати

Серед класичних конструкційних матеріалів саме сталі продовжують залишатися основою для виробництва броні. Їх удосконалення в контексті зменшення ваги пов'язано із суттєвим додаванням до складу алюмінію, а також незначного підвищення вмісту кремнію та вуглецю. Таким чином можливо зменшити густину сталі з 7,9 до 6,2 г/см³, тобто – на величину до 20% [6-8].

Додавання алюмінію, яке сприяє суттєвому зниженню густини, також спричиняє утворення крихких інтерметалідних фаз, які негативно впливають на весь комплекс механічних характеристик надлегких сталей. Задля компенсації негативного впливу сталь має містити велику кількість марганцю, яка повинна приблизно в два рази переважати вміст алюмінію [6, 9]. При такому хімічному складі сталі з високим вмістом марганцю та алюмінію можуть мати багатофазову будову, зміцнюватись деформаційною, термічною і термомеханічною обробками, а також нанорозмірними к-карбідами в умовах старіння сплавів після гартування. За рахунок такої великої кількості можливих механізмів зміцнення та регулювання основних механічних характеристик, в межах одного сплаву міцність може змінюватись в 2-2,5 рази, а твердість зростати з 42 до 58 HRC, в залежності від послідовності деформаційної та термічної обробки [6, 10]. Міцність деяких представників таких сталей може складати 2 ГПа, а пластичність та ударна в'язкість при цьому становлять не менше 8-12 % та 25-35 Дж/см² відповідно. Твердість сплавів може знаходитись в межах 52-58 HRC без деформаційної обробки, тобто в литому стані [6].

При масовому виробництві сталей, як звичайних, так і надлегких, важливу роль відіграють складність і точність їх хімічного складу, вартість легуючих елементів та здатність до вторинної переробки. Ці фактори найбільше впливають на вартість матеріалів, так само як і подальша складність їх деформаційної, термічної обробки, зварювання та ін.

Якщо порівняти хімічний склад найбільш розповсюджених броньових сталей, які використовуються в Україні, з надлегкими високоміцними сталями (табл. 1), можна помітити, що до останніх висувається менше вимог у дотриманні точності хімічного складу, а їх вартість може бути меншою за класичні сталі через переважну відсутність високовартісного нікелю. Крім того, при виробництві надлегких високоміцних сталей може використовуватись значна кількість вторинної сировини, включаючи відходи звичайних сталей, брухт військової техніки, моторний лом, феросплави та ін., що суттєво здешевлює виробництво.

Механічні властивості перелічених сталей приведено в табл. 2. З цих даних можна помітити, що необхідний рівень твердості знаходиться в межах 54-60 HRC. При значеннях вище 58-60 HRC зазвичай важко зберегти ударну в'язкість вище 10 Дж/см², тому можна сказати, що оптимальна твердість броньової сталі повинна знаходитись в межах 54-58 HRC.

Мінімальними бажаними значеннями межі плинності та межі міцності комерційних сталей найвищого класу захисту є показники на рівні 1300 та 1600 МПа відповідно. Пластичність сталей має бути не нижчою 5-7 %, що вказує на високий опір крихкому руйнуванню. Також не бажано, щоб цей показник перевищував 12-15 % через небезпеку надто сильного деформування бронееlementу.

Таблиця 1 – Порівняння хімічних складів сталей, які використовуються, або можуть бути використані для виробництва броні [6, 10-14]

Найменування сталей	Хімічний склад, % мас. (Fe – основа)									
	Mn	Al	Si	C	Cr	Ni	Mo	S	P	Інше
Armoх 600 T, Armoх Advance	≤ 1	–	≤ 0.7	≤ 0.47	≤ 1.5	≤ 3	≤ 0.7	≤ 0.003	≤ 0.01	≤ 0.005 B
Hardox 600, Hardox extreme	≤ 1.4	–	≤ 0.7	≤ 0.47	≤ 1.2	≤ 2.5	≤ 0.7	≤ 0.01	≤ 0.015	≤ 0.005 B
Ramor 550, 600	≤ 1.5	–	≤ 0.7	≤ 0.36-0.4	≤ 1.5	≤ 2.5	≤ 0.8	≤ 0.01	≤ 0.015	≤ 0.005 B
Mars 600, Mars 650	0.7	–	1	0.55	0.4	2.4-4.5	0.5	≤ 0.002	≤ 0.01-0.02	0.003 B
Сталь 71	0,6-1	0,015-0,05	1,2-1,5	0,29-0,36	1,5-2	2-2,4	0,45-0,55	≤ 0.003	≤ 0.012	0,005-0,025 Ti
45ХН2МФА	0,5-0,8	–	0,17-0,37	0,42-0,5	0,8-1,1	1,3-1,8	0,2-0,3	≤ 0,025	≤ 0,025	0,1-0,18 V, ≤ 0.3 Cu
Fe-24Mn-11Al-1,4C	23,8-24,5	10,5-11	0,25-0,35	1,3-1,4	–	–	–	–	–	–
Fe-30Mn-9Al-0,9C-1Si	29,5-30,5	8,8-9,1	0,5-1	0,85-1,05	–	–	–	–	–	–
Fe-18Mn-10Al-0.9C-5Ni	17,5-18,5	9,5-10,2	0,2-0,3	0,85-0,92	–	4,7-5,1	–	–	–	–

Ударна в'язкість, яка найбільш сильно корелює з твердістю і пластичністю матеріалу, також сильно залежить від структурних характеристик і анізотропії. Загалом вона також відповідає за недопущення крихкого руйнування елементів захисту, їх надійність і довговічність. Високий рівень ударної в'язкості з одночасно високою твердістю і пластичністю в межах 5-10 % є пріоритетним поєднанням властивостей, при якому межа міцності має другорядне значення і може мати значення порядку 1200 МПа.

Таблиця 2 – Механічні властивості сталей, хімічний склад яких наведений у табл. 1 [6-10, 12-14]

Сталі	Механічні властивості				
	HRC	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	KCV, Дж/см ²
Armoх 600 T	55-60	≥ 1400	1600-2000	≥ 7	≥ 12
Armoх Advance	58-63				
Hardox 600	54-60				
Hardox extreme	57-63				
Ramor 500	54-60	≥ 1500	1800-2000	≥ 8	≥ 60
Ramor 600	54-60				
Mars 600, Mars 650	54-62	≥ 1300	≥ 2000	≥ 7	≥ 8, ≥ 16
Сталь 71	54-58	≥ 1600	≥ 1800	≥ 8	25-30
45ХН2МФА	54-62	≥ 1275	≥ 1420	≥ 7	≥ 39
Fe-24Mn-11Al-1,4C (литий)	44-52	≥ 1220	≥ 1250	≥ 8	~ 25
Fe-30Mn-9Al-0,9C-1Si	42-48	1200	≥ 1400-1600	≥ 9	71
Fe-18Mn-10Al-0.9C-5Ni	35-46	≥ 1150	≥ 1230	≥ 12	≥ 28

Власне, комерційні сталі Ramor 500, Ramor 600 та вітчизняна сталь 71 є найбільш надійними, в контексті сказаного вище. Порівнюючи їх властивості з деякими надлегкими сталями, можна помітити відповідність всіх основних показників потрібному рівню, окрім значень твердості.

Додаткове легування надлегких сталей хромом, термічна обробка і деформаційна пост-обробка здатні забезпечити підвищення їх твердості до 58 HRC. Оптимальний вміст основних легуючих елементів надлегких сталей, які можна застосовувати для виготовлення елементів бронезахисту військової техніки, враховуючи оптимальні значення механічних характеристик, буде наступним: (25-28)Mn, (10-12)Al, (1,1-1,4)C, (0,5-1)Si, (0-5)Cr (% мас.), залізо – основа [6]. Мікролегування, модифікування та додавання нікелю до 5 % мас. є опціональним. Вартість і недефіцитність компонентів надлегких сталей сприяє формуванню їх адекватної кінцевої вартості, яку можна порівняти зі звичайними інструментальними сталями, особливо за умов використання вторинної сировини.

Кінцеве регулювання механічних характеристик надлегких сталей, як було сказано вище, може здійснюватися комбінацією деформаційної та термічної обробки і холодною пластичною деформацією в якості пост-обробки. При цьому, менша міцність і вища пластичність є технологічними перевагами для забезпечення більш якісного зварювання [13], а особливості структурно-фазового стану матеріалу забезпечують максимальне розподілення ударних навантажень і одночасне стрибкоподібне зміцнення зони контакту з уражаючим елементом, що надаватиме матеріалу зміцнення в процесі експлуатації та підвищуватиме надійність бронезахисту [7].

Висновки

Розглянуто актуальність і наведено приклади застосування легких елементів броні для військової техніки. Порівняння хімічного складу та механічних властивостей деяких з найбільш відомих комерційних марок броньових сталей та кількох надлегких високоміцних сталей показали близькість властивостей обох типів сплавів, що безпосередньо вказує на доцільність і перспективність застосування надлегких сталей саме в якості елементів захисту броньованої військової техніки. Враховуючи високий потенціал надлегких сталей до зміцнення за допомогою застосування деформаційної, термічної обробки та їх комбінування, можливо досягти в них комплексу механічних характеристик на рівні сталей Ramor 600 та Mars 650. Вартість розглянутих сталей, що мають низьку густину є співставною або нижчою за звичайні інструментальні сталі через можливість застосування у виробництві великої кількості вторинної сировини, особливо – військового та моторного лому. Надлегкі сталі є достатньо технологічними і можуть піддаватися зварюванню.

Фінансування

Дослідження проведено в рамках виконання Проєкту 2023.04/0021 “Одержання елементів броні з надлегких сталей для військової техніки з використанням вторинної сировини”. Проєкт реалізовано за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України, конкурс “Наука для зміцнення обороноздатності України”.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Чепков І. Б. і Нор П.І. (2014). Загальні тенденції розвитку озброєння та військової техніки. *Озброєння та військова техніка*, 1, 4-13.
2. Teoman A., Gode E. and Cetin B. (2021). Advanced aluminum alloys used in land combat vehicle applications. *Proceedings of the International 10th Automotive Technologies Congress*, September 6-7, At: Bursa, Türkiye, 840-844.

3. Siengchin S. (2023). A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments. *Defence Technology*, 24., 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.02.025>
4. Bowles N. (2020) \$20 million grant funds effort to develop ultra-high strength and lightweight steels for U.S. Army Retrieved from: <https://news.mst.edu/2020/12/20-million-grant-funds-effort-to-develop-ultra-high-strength-and-lightweight-steels-for-u-s-army/>
5. Yunanda W.W., Gunadi G.I. and Kasim K. (2022). Metal as a Ballistic-Resistant Lightweight Protective Material in the Military Field. *International Journal of SocialScience Research and Review*, 5, 287-296. <http://dx.doi.org/10.47814/ijssrr.v5i12.808>
6. Ringer Nature Switzerland AG 2020R. Rana (ed.), High-Performance Ferrous Alloys, Chapter 6, Low-density steels. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53825-5_6
7. Howell, R.A., Montgomery, J.S. and Van Aken, D.C. (2009). Advancements in Steel for Weight Reduction of P900 Armor Plate, *AIST, PR-PM0709-7*.
8. Sebek K. et al. (2018). High Mn, high Al steels for thick plate armor applications. *Ndia ground vehicle systems engineering and technology symposium materials & advance manufacturing (M&AM) technical session*, August 7-9, Nova, Michigan
9. Верзілов О.П., Ворон М.М. та ін. (2021) Сучасний стан та перспективи розробки високопластичних надміцних сталей Fe-Mn-Al-C. Повідомлення 1. *Метал та лиття України* (2), 101-109. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.101>
10. Ворон М.М., Семенко А.Ю. та ін. (2023). Структурно-фазові характеристики та механічні властивості TWIP-сталі Fe-24Mn-11Al-1.4C. *Металознавство та обробка металів* (4), 50-57. <https://doi.org/10.15407/mom2023.04.050>
11. Chemical composition of Ssab steels. URL: <https://www.ssab.com/en>
12. МСК Україна. URL: <https://mskukraine.com/uk/katalog-produkcziyi/bronestal-uk/>
13. Костін В. А., Позняков В. Д. та ін. (2020). Вплив структурних перетворень на механічні властивості зварних з'єднань броньованих сталей. *Фізико-хімічна механіка матеріалів* (4), 36-43.
14. Piston M., Bartlett L. et al. (2020). Microstructural Influence on Mechanical Properties of a Lightweight Ultrahigh Strength Fe-18Mn-10Al-0.9C-5Ni (wt.%) *Steel. Metals* (10), 1305. <https://doi.org/10.3390/met10101305>

References

1. Chepkov I. B. and Nor P. I. (2014). General trends in the development of weapons and military equipment. *Arms and Military Equipment*, 1, 4-13.
2. Teoman A., Gode E. and Cetin B. (2021). Advanced aluminum alloys used in land combat vehicle applications. *Proceedings of the International 10th Automotive Technologies Congress*, September 6-7, At: Bursa, Türkiye, 840-844.
3. Siengchin S. (2023). A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments. *Defence Technology*, 24., 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.02.025>
4. Bowles N. (2020) \$20 million grant funds effort to develop ultra-high strength and lightweight steels for U.S. Army Retrieved from: <https://news.mst.edu/2020/12/20-million-grant-funds-effort-to-develop-ultra-high-strength-and-lightweight-steels-for-u-s-army/>
5. Yunanda W.W., Gunadi G.I. and Kasim K. (2022). Metal as a Ballistic-Resistant Lightweight Protective Material in the Military Field. *International Journal of SocialScience Research and Review*, 5, 287-296. <http://dx.doi.org/10.47814/ijssrr.v5i12.808>
6. Ringer Nature Switzerland AG 2020R. Rana (ed.), High-Performance Ferrous Alloys, Chapter 6, Low-density steels. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53825-5_6

7. Howell, R.A., Montgomery, J.S. and Van Aken, D.C. (2009). Advancements in Steel for Weight Reduction of P900 Armor Plate, *AIST, PR-PM0709-7*.
8. Sebek K. et al. (2018). High Mn, high Al steels for thick plate armor applications. *Ndia ground vehicle systems engineering and technology symposium materials & advance manufacturing (M&AM) technical session*, August 7-9, Nova, Michigan
9. Verzilov O.P., Voron M.M., Semenko A. Yu., Shemet V.Zh. (2021). The current state and the prospects for the development of high-plasticity ultrastrong Fe-Mn-Al-C steels. *Communication 1. Metal and Casting of Ukraine* (2), 101-109. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.101>
10. Voron M. M., Semenko A. Yu, Tymoshenko A. M., Shemet V. Zh. (2023). Structural and phase characteristics and mechanical properties of TWIP steel Fe-24Mn-11Al-1.4C. *Metal Science and Treatment of Metals* (4), 50-57. <https://doi.org/10.15407/mom2023.04.050>
11. Chemical composition of Ssab steels. Available from : <https://www.ssab.com/en>
12. MSK Ukraine. Retrieved from: <https://mskukraine.com/uk/katalog-produkcziyi/bronestal-uk/>
13. Kostin V. A., Poznyakov V. D. and others (2020). Influence of structural transformations on the mechanical properties of welded joints of armored steels. *Physical and Chemical Mechanics of Materials* (4), 36-43.
14. Piston M., Bartlett L. et al. (2020). Microstructural Influence on Mechanical Properties of a Lightweight Ultrahigh Strength Fe-18Mn-10Al-0.9C-5Ni (wt.%) Steel. *Metals* (10), 1305. <https://doi.org/10.3390/met10101305>