

Медведєв М. І.
Бобух О. С.
Кузьміна О. М.
Самсоненко А. А.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КУВАННЯ ТРУБНИХ ЗАГОТОВОК З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ ТОВ "ДНІПРОПРЕС СТАЛЬ"

Робота присвячена удосконаленню процесу кування титанових сплавів в умовах ТОВ «Дніпропрес Сталь». При виробництві трубних заготовок з нікелевих й титанових сплавів широко застосовується кування круглих злитків діаметром 350 – 950 мм, отримуваних методом вакуумно-дугової або електронно-променевої плавки. При куванні таких зливків виникає значна нерівномірність деформації за перерізом поковки, що впливає на отримувані структуру та механічні властивості напівпродукту, що в свою чергу істотно обмежує технологічні можливості їх переробки. За попередньою технологією кування трубної заготовки з титанового сплаву Grade 2 (вітчизняний аналог ВТ1-0) складалась з протяжки заготовки Ø 630 мм довжиною 1300-1500 мм за три виноси з проміжним підігрівом. За результатами досліджень темплетів на якість металу було виявлено, що макроструктура поковки неоднорідна за перерізом, спостерігаються зони з різною величиною зерна й різною протравленістю. Всередині поковки зерна великі, наявні виділення α -фази, з чіткою границею між зонами, що може негативно відбиватись при пресуванні, оскільки це призводить до утворення розшарувань, тріщин й плів. Для покращення структури й механічних властивостей, що забезпечують отримання бездефектних гарячопресованих труб, запропоновано удосконалити технологічний процес кування в умовах ВАТ «Дніпропрес Сталь» за рахунок зміни параметрів деформації та введення додаткових операцій. Аналіз результатів кування злитків відповідно до запропонованого режиму й металографічних досліджень якості металу трубної заготовки показав, що метал по всьому перерізу має щільну макроструктуру 5-го балу, мікроструктуру 3-го типу, твердість за Брінеллем 185 – 196 НВ, що у подальшому забезпечує бездефектне пресування передільних труб та їх наступну холодну прокатку з отриманням механічних властивостей, що відповідають вимогам нормативної документації ASTM B 338-91a «Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers».

Ключові слова: технологія кування, титанові сплави, трубна заготовка, мікро- и макроструктура

При виробництві трубних заготовок з нікелевих й титанових сплавів широко застосовується кування круглих злитків діаметром 350 – 950 мм, отримуваних методом вакуумно-дугової або електронно-променевої плавки. При куванні таких злитків виникає значна нерівномірність деформації за перерізом поковки, що впливає на отримувані структуру та механічні властивості напівпродукту, що в свою чергу істотно обмежує технологічні можливості їх переробки.

Поведінка матеріалу при куванні, вплив деформаційних параметрів при гарячій деформації та наслідки, що спричиняються вказаними факторами, зокрема для титанових сплавів, вивчаються багатьма дослідниками в усьому світі. Наприклад, у роботі [1] досліджується плин титанового сплаву Ti-10V-4,5Fe-1,5Al при осадці в діапазоні температур 650–900 °C та швидкості деформації 0,001–100 с⁻¹, аналізується динаміка мікроструктури досліджуваного сплаву. Аналогічні дослідження проведені для метастабільного сплаву Ti-3,5Al-5Mo-6V-3Cr-2Sn-0,5Fe-0,1B-0,1C у роботі групи китайських науковців [2]. Безпосередньо причинам виникнення нерівномірності деформації при осадці титанового сплаву ВТ3-1 присвячена робота казахських вчених [3]. Нерівномірність структури кованих титанових дисків як причина руйнування їх при експлуатації досліджувалась у роботі [4].

Предметом дослідження є технологія кування титанових злитків, зокрема вплив основних факторів деформації на нерівномірність структури та механічні властивості металу поковки.

Метою даної роботи було удосконалення процесу кування титанових сплавів для запобігання значній нерівномірності структури за рахунок зміни технологічних параметрів існуючого виробництва в умовах ТОВ «Дніпропрес Сталь». В статті вирішуються наступні

завдання: дослідження існуючої технології кування титанових злитків в умовах ТОВ «Дніпропрес Сталь»; визначення характеристик макроструктури отримуваних поковок; розробка рекомендацій щодо удосконалення існуючої технології кування на базі основних закономірностей процесу кування та особливостей титанових сплавів; експериментальне кування титанових злитків з використанням розроблених рекомендацій; аналіз отриманих результатів.

З метою визначення впливу режимів деформації на структуру й механічні властивості кованих трубних заготовок в умовах ВАТ «Дніпропрес Сталь» було проведено кування експериментальних злитків з титанового сплаву Grade 2 (вітчизняний аналог ВТ1-0, хімічний склад див. таблицю 1) діаметром \varnothing 630 мм, довжиною 1300 – 1500 мм поставки Запорізького титано-магнієвого комбінату (плавка 0158-2-17), сумарна довжина заготовок складала 8 м. Всі злитки отримані після обточування. Нагрів злитків здійснювали у газових печах. З метою зниження окалиноутворення на поверхню злитків наносили спеціальне захисне покриття марки «Хенкель».

Таблиця 1

Хімічний склад титанового сплаву Grade 2

Хімічний елемент	Вуглець, С	Водень, Н	Кисень, О	Азот, N	Залізо, Fe	Всього домішок	Інші елементи	Титан, Ti
Зміст, %	< 0,08	< 0,015	< 0,25	< 0,03	< 0,30	< 0,4	< 0,1	залишок

Існуючий технологічний процес кування в умовах ВАТ «Дніпропрес Сталь» містить такі операції:

1 винос: Нагрів злитку до 1050 °С. Протяжка злитку з \varnothing 630 мм до \varnothing 420 мм. Посадка в піч для підігріву.

2 винос: Протяжка злитку з \varnothing 420 мм до \varnothing 320 мм з наступною розрубкою на 3 частини. Посадка в піч для підігріву.

3 винос: Протяжка злитку з \varnothing 320 мм до \varnothing 235 мм .

З метою дослідження якості металу поковок були відібрані темплети від переднього кінця поковки, центральної її частини й заднього кінця поковки. Схема розкрою поковки із темплетами наведена на рис. 1.

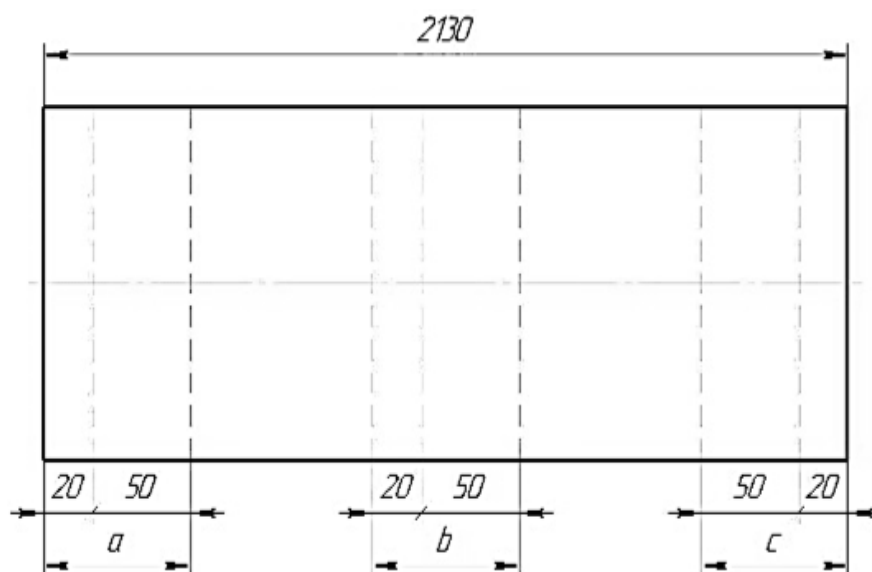


Рис. 1. Схема відбору темплетів, де:

a – передній кінець поковки; b – середина поковки; c – задній кінець поковки

З темплетів довжиною 50 мм були виготовлені зразки для механічних випробувань металу поковки. Результати механічних випробувань наведені в таблиці 2.

Темплет кованої заготовки Ø 235 мм та довжиною 20 мм був розрізаний на 4 частини й підготовлений шляхом шліфування для виявлення макроструктури. Після травління оцінена макроструктура, що наведена на рис. 2.

Таблиця 2

Результати механічних випробувань металу поковки

№ п/п	Місце розташування	Маркування	σ_b , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ_5 , %	Ψ , %	Ударна в'язкість, кгс·м/см ²	НВ
1	Передній кінець	центр	47,0	36,0	20,0	72,0	20,0	156
2		середина	49,5	38,5	21,0	59,0	19,9	152
3		периферія	45,0	37,5	19,0	51,0	18,3	149
1	Середина	центр	47,0	40,5	30,0	52,0	18,0	149
2		середина	47,5	39,0	20,0	56,0	20,4	152
3		периферія	48,0	41,0	25,0	60,0	23,4	152
1	Задній кінець	центр	43,0	36,0	28,0	59,0	19,8	152
2		середина	46,0	39,0	29,0	61,0	21,0	152
3		периферія	48,5	42,0	23,0	65,0	16,0	149

Як видно з рисунку, макроструктура злитка неоднорідна за перерізом. Спостерігаються зони з різною величиною зерна й різною протравленістю. В середині злитка зерна великі, наявні виділення α -фази (світлі ділянки). При цьому чітко проглядається границя між зонами, що може негативно відбиватись при пресуванні, оскільки це призводить до утворення розшарувань, тріщин й плів. Заміри твердості на темплеті показали також неоднорідність злитка. В центрі середні значення твердості за Бринелем 152...173 НВ, а на периферії 190...198 НВ.

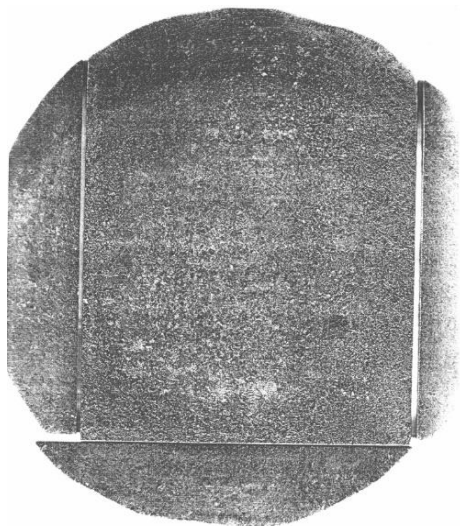


Рис. 2. Макроструктура кованої заготовки

На поверхні темплету видна тріщина довжиною 5 мм, розташована за гвинтовою лінією й така, що виходить на зовнішню поверхню (рис. 3). Крім того, спостерігаються більш дрібні тріщини довжиною до 0,1 мм. Всі перелічені дефекти злитка негативно відбиваються на деформаційній здатності при пресуванні труб й можуть призводити до різного виду дефектів продукції (пліви, надриви, тріщини й т. п.).

Слід відзначити, що механічні характеристики металу поковок достатньо високі, відповідають вимогам ГОСТ 26492-85 для катаного прутка марки ВТ1-0 (аналог Gr. 2).

Отримані куванням прутки використовували для пресування передільних труб розміром Ø 78×14 мм на горизонтальному гідравлічному пресі силою 16 МН при температурі нагріву 930 – 950 °С.

Макроструктура кільця труби після пресування, яка представлена на рис. 4, щільна, однак по зовнішній поверхні спостерігаються зони різної

твердості, що свідчить про наявність аномальних структурних зон деформаційно-рекристалізаційного походження.

Наявність таких зон в кований заготовці частково наслідуються в трубах при пресуванні. Утворенню зон сприяє неоднорідність хімічного складу в мікрооб'ємах.

Крім того, однією з причин може бути нерівномірність пластичної деформації, пов'язана з наявністю зон утрудненої деформації на поверхні контакту металу з інструментом, а також нерівномірність температури за перерізом заготовок, що піддаються пресуванню, на внутрішній поверхні, або невеликі тріщини.

Для покращення структури й механічних властивостей, що забезпечують отримання бездефектних гарячопресованих труб, в роботі запропоновано удосконалити технологічний процес кування в умовах ВАТ «Дніпропрес Сталь», зокрема включити такі технологічні операції (всі непозначені параметри процесу відповідають описаній раніше технології).



Рис. 3. Тріщина на зовнішній поверхні темплета (за гвинтовою лінією)

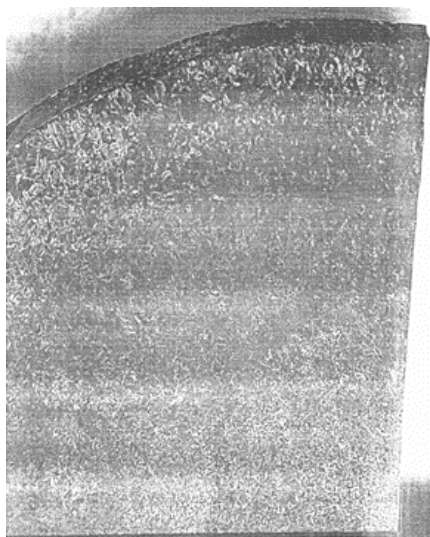


Рис. 4. Макроструктура ¼ поперечного темплета поковки

1 винос. Осадка злитка по висоті зі ступенем деформації 20 – 25 %; кантування на 90°, осадка зі ступенем деформації 20 – 25 %; кантування на 90°, осадка зі ступенем деформації 20 – 25 %. Посадка в піч для підігріву до температури 950 °С.

2 винос. Протяжка на квадрат 450 × 450 мм. Збивання кутів. Посадка в піч для підігріву до температури 950 °С.

3 винос. Протяжка на коло Ø 320 мм. Розрубка заготовок. Посадка в піч для підігріву до 950 °С.

4 винос: Протяжка на коло Ø 235 – 240 мм.

Для виявлення макроструктури темплет кованої заготовки розрізали на 2 частини; після шліфування й травління темплета оцінена макроструктура, яка наведена на рис. 4. Поковка має щільну, однорідну макроструктуру, яка згідно до ОСТ 92-9465-81 й ГОСТ 26492-85 відповідає 5 балу.

За діаметральним перерізом темплета з інтервалом 10 мм вимірювали твердість. Результати наведені в таблиці 3. Точка 1 відповідає краю темплета, точка 12 – центральній частині. Як бачимо, твердість за перерізом заготовки знаходиться в діапазоні 185 – 196 НВ.

Таблиця 3

Твердість за перерізом заготовки

№ заміру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Середнє
Твердість за Брінелем (НВ)	188	196	187	195	197	185	194	196	187	187	181	192	190

Після оцінки макроструктури й вимірювання твердості були виготовлені шліфи для дослідження мікроструктури металу в поздовжньому напрямку. Оцінка макро- й мікроструктури металу поковок проведена за участю В. С. Вахрушевої й М. І. Прокоф'єва.

Мікроструктуру оцінювали, порівнюючи з еталонами шкали для α -сплавів в ОСТ 92-9465-81 (рис. 5)

Мікроструктура темплету трубної заготовки діаметром 240 мм згідно ОСТ 92-9465-81 задовільняється, відповідає 3 типу у будь-якій його точці.

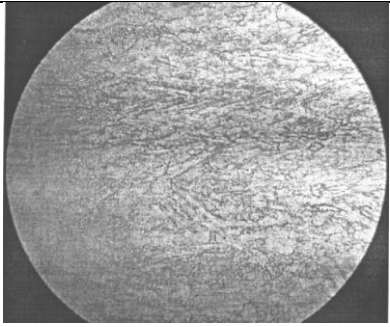
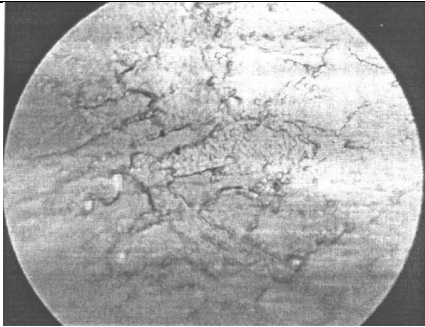
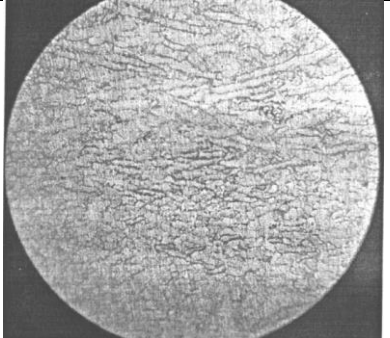
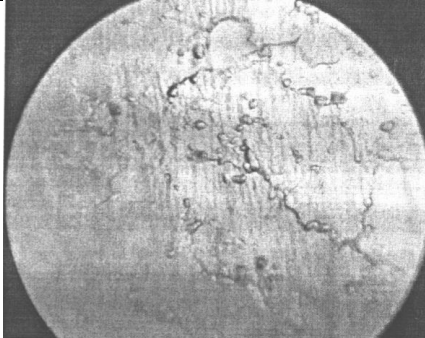
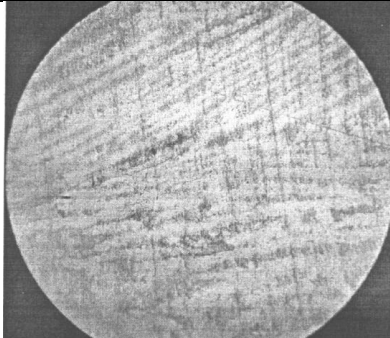

№ мікро-шліфа	× 100	× 400	Номер типу
1			3
3			3
6			3

Рис. 5. Мікроструктура по радіусу поперечного темплету від трубної заготовки діаметром 240 мм з титанового сплаву марки Grade 2

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз існуючої технології виробництва поковок з титанових сплавів, що використовуються для виробництва труб, в умовах діючого виробництва ТОВ «Дніпропрес Сталь». Контроль якості металу отримуваних поковок показав наявність істотних відхилень у мікро- та макроструктурі поковок від параметрів, що вимагаються нормативною документацією.

Запропоновано зміни технологічного процесу як за самими операціями, так і за схемами їх виконання. Аналіз результатів кування злитків відповідно до запропонованого режиму й ме-

талографічних досліджень якості металу трубної заготовки показав, що метал по всьому пере-різу має щільну макроструктуру 5-го балу, мікроструктуру 3-го типу й відповідну структуру, твердість за Брінелем 185 – 196 HB.

Характеристики трубних заготовок, отриманих за запропонованою технологією, забезпечили бездефектне пресування передільних труб розміром $\varnothing 78 \times 14$ мм на горизонтальному гідравлічному пресі 16МН при температурі нагріву заготовки 930 – 950 °С й подальшу холодну прокатку труб розміром $\varnothing 19,05 \times 1,6$ мм з механічними властивостями, що відповідають вимогам нормативної документації ASTM B 338-91a «Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Balasubrahmanyam V. V., Prasad Y. V. R. K. Deformation behaviour of beta titanium alloy Ti-10V-4.5Fe-1.5Al in hot upset forging. *Materials Science and Engineering: A*. 2002. 336. 1-2, pp. 150–158. URL: [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(01\)01982-7](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(01)01982-7) (date of access: 28.05.2022).
2. CHEN Z.-q., et al. Characterization of hot deformation and microstructure evolution of a new metastable β titanium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022. 3. 5, pp. 1513–1529. URL: [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(22\)65890-4](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(22)65890-4) (date of access: 28.05.2022).
3. Mashekov S. A., et al. Formation of the structure of titanium alloy during the change of stiffness of deforming tools. *Int. J. Chem. Sci.* 2015. 13(2), pp. 801–816.
4. Fernández D. Suárez, et al. The effect of forging texture and machining parameters on the fatigue performance of titanium alloy disc components. *International Journal of Fatigue*. 2021. 142, pp. 105949. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105949> (date of access: 28.05.2022).
5. ASTM B 338-91a. Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers. Official edition.

Medvedev M., Bobukh O., Kuzmina O., Samsonenko A. Improvement of forging titanium alloys technology at the «Dnepropress Steel» Co.Ltd.

The article is devoted to the improvement of the titanium forging process under the conditions of Dnipropres Steel LLC. In the production of pipe billets from nickel and titanium alloys, forging of round ingots with a diameter of 350-950 mm obtained by the method of vacuum-arc or electron-beam melting is widely used. During forging of these ingots there is a significant unevenness of deformation along the cross-section of the forging, which affects the resulting structure and mechanical properties of semi-finished products, which in turn significantly limits the technological possibilities of their processing. According to the previous technology of forging of a pipe billet from titanium alloy of Grade 2 (domestic analogue of VT1-0), it consisted in drawing of a billet $\varnothing 630$ mm with a length of 1300-1500 mm in three passes with intermediate heating. According to the results of the study of the quality of the metal template, it was determined that the macrostructure of the forging is heterogeneous in the cross section, there are zones with different grain sizes and different etching. Inside the grain of the forging, there are large accessible allocations of the α -phase with a clear boundary between the zones, which can be negatively affected during extrusion, as it leads to the formation of cracks and delaminations.

To improve the structure and mechanical properties that ensure the production of defect-free hot-extruded pipes, it is proposed to improve the technological process of forging in the conditions of OJSC "Dnipropres Steel" by changing the deformation parameters and additional operations. Analysis of the results of forging ingots according to the proposed regime and metallographic studies of the quality of the metal of the pipe billet showed that the metal throughout the cross-section has a dense macrostructure of the 5th grade, a microstructure of the 3rd type, Brinell hardness 185-196 HB, which subsequently ensures defect-free extrusion of the pipe billets and their subsequent cold rolling to obtain mechanical properties that meet the requirements of the ASTM B 338-91a "Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Pipes for Condensers and Heat Exchangers".

Keywords: forging technology, titanium alloys, tube billets, micro- and macrostructure.

Медведев М. И., Бобух А. С., Кузьмина О. М., Самсоненко А. А. Совершенствование технологииковки трубных заготовок из титановых сплавов в условиях ООО "Днепропресс Сталь".

Работа посвящена усовершенствованию процессаковки титановых в условиях ООО «Днепропресс Сталь». При производстве трубных заготовок из никелевых и титановых сплавов широко применяетсяковка круглых слитков диаметром 350 – 950 мм, получаемых методом вакуумно-дуговой или электронно-лучевой плавки. При ковке таких слитков возникает значительная неравномерность деформации по сечению поковки, что влияет на получаемые структуру и механические свойства полупродукта, а это в свою очередь существенно ограничивает технологические возможности их дальнейшей обработки. По существующей технологииковка трубной заготовки из титанового сплава Grade 2 (отечественный аналог VT1-0) состояла из протяжки заготовки $\varnothing 630$ мм длиной 1300-1500 мм за три выноса с промежуточным подогревом. По результатам исследований темплет на качество металла было обнаружено, что макроструктура поковки неоднородна по

сечению, наблюдаются зоны с разной величиной зерна и разной протравленностью. Внутри поковки зерна большие, имеются выделения α -фазы, с четкой границей между зонами, что может негативно отражаться при прессовании, поскольку это приводит к образованию расслоений, трещин и плен.

Для улучшения структуры и механических свойств, обеспечивающих получение бездефектных горяче-прессованных труб, предложено усовершенствовать технологический процессковки в условиях ОАО «Днепропресс Сталь» за счет изменения параметров деформации и введения дополнительных операций. Анализ результатовковки слитков в соответствии с предложенными режимами с помощью металлографических исследований качества металла трубной заготовки показал, что по всему сечению наблюдается плотная макроструктура 5-го балла, микроструктура 3-го типа, твердость по Бринеллю 185 – 196 HB, что в дальнейшем обеспечивает бездефектное прессование передельных труб и их последующую холодную прокатку с получением механических свойств, отвечающих требованиям нормативной документации ASTM B 338-91a «Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers».

Ключевые слова: технологияковки, титановые сплавы, трубная заготовка, микро- и макроструктура.

Медведєв Михайло Іванович – д-р техн. наук, ст. наук. співробітник УДУНТ
Medvedev Michael – Doctor of Technical Sciences, Senior Research Scientist USUST
Медведев Михаил Иванович – д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник УГУНТ
Email: m.i.medvedev@ust.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1230-420X>

Бобух Олександр Сергійович – канд. техн. наук, доц. УДУНТ
Bobukh Oleksandr – Candidate of Technical Science, Associate Professor, USUST
Бобух Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доц. УГУНТ
Email: o.s.bobukh@ust.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7254-3854>

Кузьміна Ольга Михайлівна – канд. техн. наук, доц. УДУНТ
Kuzmina Olga – Candidate of Technical Science, Associate Professor USUST
Кузьмина Ольга Михайловна – канд. техн. наук, доц. УГУНТ
Email: o.m.kuzmina@ust.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0794-0583>

Самсоненко Андрій Анатолійович – канд. техн. наук, доц. УДУНТ
Samsonenko Andrii – Candidate of Technical Science, Associate Professor
Самсоненко Андрей Анатольевич – канд. техн. наук, доц. УГУНТ
Email: a.a.samsonenko@ust.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6992-2327>

УДУНТ – Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро
USUST – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro
УГУНТ – Украинский государственный университет науки и технологий, г. Днепр

Стаття надійшла до редакції 10.06.22 р.