

УДК 669.1.017.548.735.6

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.050722.19.858

## ВИБІР РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТРУБ ЗІ СПЛАВУ Ti–3Al–2,5V ДЛЯ ЗНЯТТЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ НА КІНЦЕВОМУ ЕТАПІ ВИГОТОВЛЕННЯ

ВАХРУШЕВА В. С.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,ГРУЗІН Н. В.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: [vs062@ukr.net](mailto:vs062@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: [hruzin.nataliia@pgasa.dp.ua](mailto:hruzin.nataliia@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-7589-6548

**Анотація. Мета роботи:** встановлення режимів термічної обробки на заключній стадії виготовлення труб зі сплаву титану Ti–3Al–2,5V для зняття залишкових напружень згідно з вимогами стандартів ASM до поставки труб у стані CWCR, що означає після холодної обробки тиском і термічної обробки для зняття залишкових напружень. **Методи дослідження:** рентгеноструктурний аналіз для визначення текстур та побудови зворотних полюсних фігур, оцінення механічних властивостей згідно зі стандартом ASTM та залишкових напружень методом Давиденкова. Виготовлення труб за розробленими режимами у промислових умовах. **Результати.** Оцінено рівень залишкових напружень за різних температурах нагрівання труб. Обрано режим заключної термічної обробки для зняття залишкових напружень, який складає температуру нагрівання у вакуумі 380...450 °C залежно від попереднього ступеня деформації. Оцінено рівень механічних властивостей труб після прокатки та наступної термічної обробки (стан CWCR). Досліджено текстуру труб та побудовано зворотні полюсні фігури. Текстура труб в основному має радіальну складову та майже не змінюється під час кінцевої термічної обробки для зняття залишкових напружень. **Практичне значення.** Удосконалення технологічного процесу виробництва титанових труб у промислових умовах та підвищення якісних показників у процесі експлуатації. **Висновки.** Встановлено інтервал температур для зняття залишкових напружень, який складає 380...450 °C залежно від ступеня попередньої деформації. Вибраний режим термічної обробки дозволяє забезпечити рівень механічних властивостей згідно з вимогами стандарту AMS 4946. Показано, що термічна обробка практично не змінює текстури труб, зберігаючи більшу кількість радіальної складової, яка, у свою чергу забезпечує вимоги стандарту за показниками коефіцієнтів відносного стиснення.

**Ключові слова:** сплав титану Ti–3Al–2,5V; текстура; залишкові напруження; термічна обробка

## SELECTION OF HEAT TREATMENT MODES FOR PIPES FROM ALLOY TI–3AL–2,5V FOR RESIDUAL STRESSES REMOVAL AT THE FINAL STAGE OF PRODUCTION

VAKHRUSHEVA V.S.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,HRUZIN N.V.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science and Materials Processing, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: [vs062@ukr.net](mailto:vs062@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

<sup>2</sup> Department of Materials Science and Materials Processing, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: [hruzin.nataliia@pgasa.dp.ua](mailto:hruzin.nataliia@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-7589-6548

**Abstract. Purpose of research** is to determine heat treatment modes at the final stage of titanium pipes manufacturing to remove residual stresses in accordance with the requirements of ASM standards before delivery of pipes in CWCR condition, after cold pressure treatment and heat treatment to remove residual stresses. **Research methods:** X-ray diffraction analysis for texture and inverse pole figures construction, evaluation of mechanical properties according to the ASTM standard and residual stresses by the Davydenkov method, as well as production of pipes, according to the developed modes in industrial conditions. **Results.** The residual stresses level at different heating temperatures of the pipes is evaluated. The mode of final heat treatment to remove residual stresses, which heating temperature in vacuum is 380...450 °C, depending on the previous degree of deformation was selected. Mechanical properties of pipes after rolling and subsequent heat treatment (CWCR state) are evaluated. The texture of the pipes

mainly has a radial component and almost does not change during the final heat treatment to remove residual stresses. **Practical value** is to improve the technological process of titanium pipes production in industrial conditions and the quality of operation. **Conclusions.** The temperature range for removal of residual stresses, which is 380...450 °C, is set depending on preliminary deformation degree. The selected mode of heat treatment allows ensuring mechanical properties level in according to the requirements of AMS 4946. It is shown that heat treatment does not change the texture of the pipes, retaining more radial component, which provides relative compression ratios.

**Keywords:** titanium alloy Ti-3Al-2,5V; texture; residual stresses; heat treatment

## Вступ

Організація виробництва труб із титанових сплавів потребує розроблення видів і режимів термічної обробки у технологічному процесі їх виготовлення. Відомо, що основними види термічної обробки титанових сплавів – це відпал, гартування, старіння та відпал для зняття напружень. Слід зазначити, що дослідження термічної обробки сплавів титану не систематизовані і стосуються в основному прутків, листів та конструкцій [1; 2]. Стосовно труб із титану деякі питання розглядаються у працях зарубіжних авторів [3; 4].

Нові стандарти на труби для аерокосмічної техніки включають і нові вимоги для властивостей труб зі сплаву титану. Під час виготовлення труб використовують як проміжний рекристалізаційний відпал, так і відпал для зняття напружень, що виникають у процесі деформації. У стандартах ASM 4946, AS 4076 [5; 6] уведено вимоги до поставки готових труб у стані CWCR, що означає після холодної обробки тиском і термічної обробки для зняття напружень. Такий вид термообробки потрібен конструкторам для можливості використовувати труби як напівфабрикати для виготовлення деталей літаків.

## Мета роботи

Мета дослідження – встановлення режимів термічної обробки на заключній стадії виготовлення труб із титану для зняття залишкових напружень згідно з вимогами стандартів ASM до поставки труб у стані CWCR, що означає після холодної обробки тиском і термічної обробки для зняття напружень.

## Матеріал та методика досліджень

Матеріалом для дослідження вибрано труби зі сплаву титану Ti-3Al-2,5V готових розмірів на завершальному етапі їх виготовлення. Оцінювали рівень механічних властивостей згідно зі стандартом [7]. Досліджено текстуру труб за допомогою рентгеноструктурного аналізу з побудовою зворотних полюсних фігур [8; 9]. Крім того, проведено аналіз залишкових напружень. Залишкові напруження оцінювали методом Давиденкова, розрізанням кілець [10].

## Результати досліджень

Досліджено структуру, текстуру та властивості труб після термообробки для зняття напружень (CWCR). Термообробку здійснювали за температури нижче температури рекристалізації металу, за якої відбуваються процеси повернення.

Дослідження труб після холодної деформації показало такий рівень механічних властивостей:

$$\sigma_B = 1\,030 \dots 1\,050 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{02} = 890 \dots 900 \text{ МПа,}$$

$$\delta = 7 \dots 11 \text{ \%}.$$

Труби після прокатки на готовий розмір піддавали термічній обробці в інтервалі температур 100...700 °C, витримка одна година у вакуумній печі ОКБ 1371А з охолодженням із пічню. Зразки для дослідження брали від труб готових розмірів.

На рисунку 1 наведено графік зміни залишкових напружень після термічної обробки залежно від температури термічної обробки. Згідно з вимогами стандарту, за яким виготовляються труби AMS 4946, показники механічних властивостей повинні бути такими:

$$\sigma_B = 862 \dots 979 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{0,2} = \geq 724 \text{ МПа,}$$

$$\delta = \geq 14 \text{ \%}$$

Як видно з наведених даних, оптимальною температурою для зняття

напружень є температура 380...450 °С, за якої виконуються вимоги до рівня властивостей згідно із стандартом.

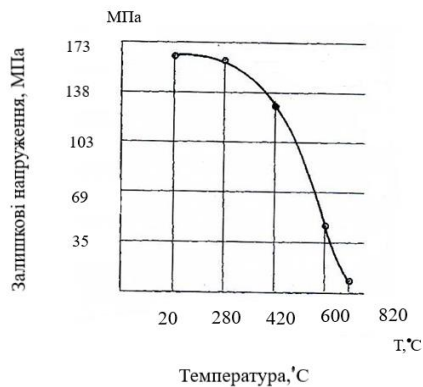


Рис. 1. Залежність залишкових напружень від температури відпалу

Термічна обробка труб у технологічному процесі виготовлення використовується, як вже зазначалось, різних видів, залежно від стадії процесу. Після кожного

проходу холодної деформації труби піддаються рекристалізаційному відпалу, а на готовому розмірі – відпалу для зняття напружень (CWCR).

Таблиця 1

Показники інтенсивностей рентгенівських ліній для зразків після відпалу (№№ 9...10)

<i>hkl</i>	<i>9R</i>	<i>9T</i>	<i>10R</i>	<i>10T</i>
<b>10.0</b>	6 537	8 220	4 345	6 710
<b>00.2</b>	29 079	29 384	30 759	26 890
<b>10.1</b>	30 299	37 452	27 890	34 975
<b>10.2</b>	6 559	6 148	6 843	6 344
<b>11.0</b>	4 637	4 486	5 286	4 483
<b>10.3</b>	9 102	7 975	10 003	9 516
<b>20.0</b>	655	864	357	1 018
<b>11.2</b>	6 601	5 500	6 693	5 949
<b>20.1</b>	2 974	3 366	1 887	3 219
<b>00.4</b>	2 353	2 316	2 554	2 228
<b>20.2</b>	949	921	866	847
<b>10.4</b>	1 721	1 600	2 350	1 559
<b>20.3</b>	2 234	2 413	1 909	2 684
<b>21.0</b>	629	526	459	600
<b>21.1</b>	2 720	2 685	2 912	3 606
<b>11.4</b>	4 373	3 786	4 948	4 271
<b>21.2</b>	1 323	1 310	1 384	1 332
<b>10.5</b>	4 959	4 979	6 334	4 738
<b>20.4</b>	1 203	1 350	1 274	1 800
<b>30.0</b>	1 470	1 810	1 010	1 390
<b>21.3</b>	5 914	5 072	5 590	5 985
<b>30.2</b>	3 340	3 846	2 674	3 840

Таблиця 2

Розподіл щільності полюсів  $P_{hkl}$  і показників текстурного параметра Кернса ( $f$ ) під час зйомки зразків після термічної обробки (№№ 9...10) в радіальній ( $R$ ) та тангенціальній ( $T$ ) проєкціях

$(hkl)$	$9R$	$9T$	$10R$	$10T$
<b>100</b>	0,69	0,91	0,43	0,67
<b>002</b>	<b>2,78</b>	<b>2,90</b>	<b>2,83</b>	<b>2,55</b>
<b>101</b>	0,76	0,95	0,67	0,84
<b>102</b>	1,24	1,27	1,24	1,15
<b>110</b>	0,77	0,77	0,83	0,73
<b>103</b>	1,46	1,33	1,53	1,50
<b>112</b>	1,02	0,88	0,98	0,90
<b>201</b>	0,64	0,75	0,39	0,68
<b>104</b>	1,72	1,66	2,24	1,54
<b>203</b>	0,86	0,96	0,70	1,02
<b>210</b>	0,75	0,65	0,52	0,71
<b>211</b>	0,55	0,56	0,56	0,71
<b>114</b>	1,30	1,17	1,40	1,25
<b>212</b>	0,78	0,80	0,77	0,77
<b>105</b>	1,86	1,93	2,26	1,75
<b>213</b>	0,87	0,77	0,78	0,86
<b>302</b>	0,58	0,69	0,44	0,66
$f =$	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>	<b>0,49</b>	<b>0,44</b>

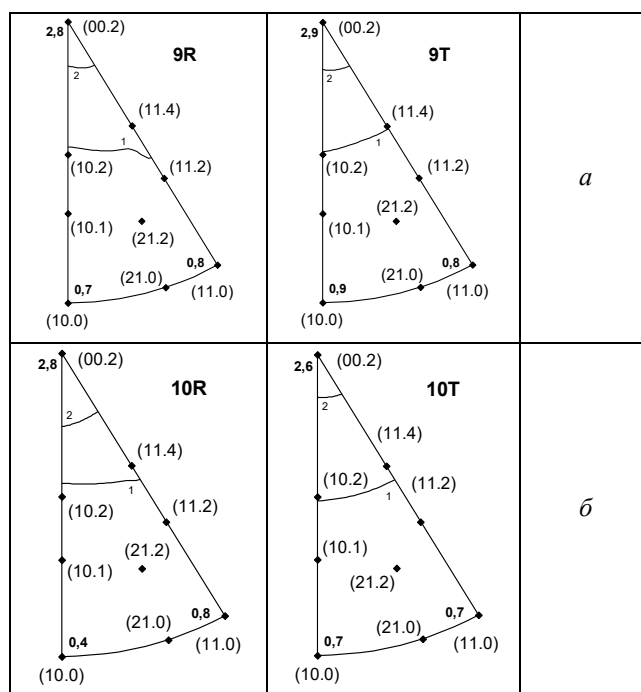


Рис. 2. Зворотні полюсні фігури труб розміром  $\text{Ø}17,5 \times 1,7$  мм (після термічної обробки за режимом  $650^\circ\text{C}$  30 хв): а – пакет 0928; б – пакет 0929

Одне з питань, поставлених у завданнях дослідження, – визначити, як різні режими термічної обробки впливають на зміну текстури і властивостей. Дослідження показали, що збільшення ступеня

деформації в проходах на проміжних розмірах вимагає деякого підвищення температури рекристалізаційного відпалу на  $30\text{...}50^\circ\text{C}$  залежно від ступеня деформації. Це зумовлено тим, що необхідно зберегти,

з одного боку, дрібне зерно, а з іншого – сформувані властивості для подальшої переробки труб, прокатаних зі збільшеними ступенями деформації. На готовому розмірі режими термічної обробки також можуть коригуватися для отримання необхідного рівня механічних властивостей і коефіцієнта відносного стиснення CSR.

Досліджено вплив термічної обробки у вигляді рекристалізаційного відпалу труб після холодної деформації на розмірі  $\text{Ø}17,5 \times 1,7$  мм на текстуру труб. Термічну обробку проводили за режимом  $650^\circ\text{C}$  30 хвилин у вакуумі. Результати досліджень текстури труб після термічної обробки наведені у таблицях 1, 2.

Якщо після деформації на розмірі  $\text{Ø}17,5 \times 1,7$  мм текстура труб була такою: радіальна 43...44 %, а тангенціальна 45...51 %, то після термічної обробки радіальна складала 45...49 %, а тангенціальна 44...45 %, практично однаково, незначно збільшилася радіальна текстура і зменшилася тангенціальна складова. Отримані результати свідчать, що термічна обробка кардинально не змінює текстури прокатки.

Важливим результатом дослідження стало те, що проведена після деформації термічна обробка для зняття напружень за температури нижче температури рекристалізації практично не змінює текстури деформації, зберігаючи переважно радіальну текстуру.

### Висновки

Під час виготовлення труб із титанового сплаву Ti-3Al-2,5V основними видами термічної обробки стали рекристалізаційний відпал та зняття залишкових напружень. Установлено інтервал температур для зняття залишкових напружень на заключній стадії виготовлення труб, який складає  $380\text{...}450^\circ\text{C}$  залежно від ступеня попередньої деформації.

Вибраний режим термічної обробки дозволяє забезпечити рівень механічних властивостей згідно з вимогами стандарту AMS 4946. Показано, що термічна обробка практично не змінює текстури труб, зберігаючи більшу кількість радіальної складової, яка, у свою чергу, забезпечує показники коефіцієнтів відносного стиснення.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Колачев Б. А., Садков В. В., Талалаев В. Д. Вакуумный отжиг титановых конструкций. Москва : Машиностроение, 1991. 224 с.
2. Колачев Б. А., Габидулин Р. И., Пигузов Ю. В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. Москва : Металлургия, 1992. С. 180–255.
3. Yang Yingli, Guo Dizi, Zhao Hengzhang, Su Hangbiao, LuoYuan, Lu Yafeng Effect of oxygencontent on the properties of commercial pure titanium tubes. *Ti 2011 Proceedings of the 12 conference on titanium*. 2012. Vol. 2. Pp. 1161–1164.
4. Jinhui Xi etc. Effect of heat treatment on microstructure and properties of Ti-3Al-2,5V titanium alloy tubes. *Ti 2011 Proceedings of the 12 world conference on titanium*. 2012. Vol. 2. Pp. 1079–1082.
5. AMS 4946 C. Titanium alloy tubing, seamless, hydraulic 3Al-2,5V, controlled contractile strain ratio, cold worked, stress relieved. SAE International, 2006.
6. Standard AS 4076. Contractile strain ratio testing of titanium hydraulic tubing. SAE International, 1987.
7. ASTM E8-04. Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM International, 2004.
8. Бородин М. М., Спектор Э. Н. Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов. Москва : Металлургия, 1981. 272 с.
9. Бецофен С. Я., Ильин А. А., Скворцова С. В. Закономерности формирования текстуры и анизотропии механических свойств в листах из титановых сплавов. *Металлы*. 2005. № 2. С. 54–63.
10. Давиденков Н. Н. Механические свойства материалов и методы измерения деформаций. Избранные труды : в 2 т. Т. 2. Киев : Наукова думка, 1981. 656 с.

### REFERENCES

1. Kolachev B.A., Sadkov V.V. and Talalaev V.D. *Vakuumnyy otzhig titanovykh konstruksiy* [Vacuum annealing of titanium structures]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1991, 224 p. (in Russian).

2. Kolachev B.A., Gabidulin R.I. and Piguzov Yu.V. *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki tsvetnykh metallov i splavov* [Technology of heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1992, pp. 180–255. (in Russian).
3. Yang Yingli, Guo Dizi, Zhao Hengzhang, Su Hangbiao, Luo Yuanyuan and Lu Yafeng. Effect of oxygen content on the properties of commercial pure titanium tubes. *Ti 2011 Proceeding so fthe 12 conference on titanium*. 2012, vol. 2, pp. 1161–1164.
4. Jinhui Xi etc. Effect of heat treatment on microstructure and properties of Ti–3Al–2.5V titanium alloy tubes. *Ti 2011 Proceedings of the 12 : world conference on titanium*. 2012, vol. 2, pp. 1079–1082.
5. AMS 4946 C. Titanium alloy tubing, seamless, hydraulic 3Al–2.5V, controlled contractile strain ratio, cold worked, stress relieved. SAE International, 2006.
6. AS 4076 Standard. Contractile strain ratio testing of titanium hydraulic tubing. SAE International, 1987.
7. ASTM E8-04. Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM International, 2004
8. Borodkina M.M. and Spektor E.N. *Rentgenograficheskiy analiz tekstury metallov i splavov* [X-ray analysis of the texture of metals and alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1981, 272 p. (in Russian).
9. Betsofen S.Ya., Ilyin A.A. and Skvortsova S.V. *Zakonomernosti formirovaniya tekstury i anizotropii mekhanicheskikh svoystv v listakh iz titanovykh splavov* [Patterns of formation of texture and anisotropy of mechanical properties in sheets of titanium alloys]. *Metally* [Metals]. 2005, no. 2, pp. 54–63. (in Russian).
10. Davidenkov N.N. *Mekhanicheskiye svoystva materialov i metody izmereniya deformatsiy : izbrannyye trudy* [Mechanical properties of materials and methods for measuring deformations : selected works]. In 2 vol., vol. 2. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1981, 656 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 12.04.2022.