

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ТИТАНА

© 2025 г. Е. Ю. Ремшев^а*, Г. А. Воробьева^а, А. И. Олехвер^а, Т. М. Абу Фадда^а

^аБГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 1-я Красноармейская ул., 1, Санкт-Петербург, 190005 Россия

*e-mail: remshev@mail.ru

Поступила в редакцию 27.03.2024 г.

После доработки 06.11.2024 г.

Принята к публикации 17.11.2024 г.

Исследовано влияние аэроакустической обработки (ААО) на механические и технологические свойства технического титана (BT1-0). Установлена зависимость характеристик прочности и пластичности от вида обработки титана: отжиг с последующей ААО и только ААО перед пластической деформацией (испытания на растяжение) значительно снижают величину σ_B и повышают пластичность, что снижает усилия деформации, увеличивает скорость деформации. Влияние ААО на процесс пластической деформации BT1-0 (снижение прочности на ~ 200 МПа) аналогично влиянию электропластического эффекта (ЭПЭ) на прочность проволоки из BT1-0.

Ключевые слова: титан BT1-0, термическая обработка, аэроакустическая обработка, пластическая деформация, электропластический эффект

DOI: 10.31857/S0015323025010122, **EDN:** BZLDTH

ВВЕДЕНИЕ

Исследования влияния магнитных полей, ультразвука (УЗ) и электрического тока на физические, механические и технологические свойства кристаллических тел [1–11] установили, что обработка с помощью физических полей позволяет создавать материалы с новыми, более высокими свойствами [1, 5, 9] и с возможностями изготовления продукции методами, использующими высокие скорости деформации при пониженных напряжениях и температурах. Разупрочнение (пластический эффект – ПЭ) при наложении механических колебаний (УЗ) на квазистатическую механическую нагрузку образцов – это акустопластический эффект – АПЭ [6, 7]; разупрочнение под влиянием электрического тока, который пропускается в процессе пластического деформирования образцов – электропластический – ЭПЭ [8–11] и под действием постоянного магнитного поля – магнитопластический – МПЭ [2–4] эффекты. Влияние физических полей на свойства материалов часто используют при модернизации существующих технологических процессов и создании новых технологий. Для получения изделий с заданными физическими, эксплуатационными свойствами и структурой материала требуется

изучение процессов, протекающих в материалах, ранее не подвергавшихся этим видам обработки, так как автоматическая воспроизводимость результатов воздействия физических полей на свойства разных материалов практически не наблюдается. Это относится и к влиянию аэротермоакустической (АТАО) и аэроакустической (ААО) обработок, реализуемых в частотном диапазоне 600–2000 Гц, на структуру сталей и сплавов с целью формирования требуемого комплекса их механических и технологических свойств [12–16]. В работе исследовали влияние аэроакустической обработки на механические и технологические свойства титана BT1-0, который относится к широко применяемым коррозионностойким материалам.

МАТЕРИАЛ, ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование влияния ААО на свойства титана проводили на прутках BT1-0; прутки сварены. Механические свойства прутков в исходном состоянии (табл. 1, режим 1/1) находились в пределах: $\sigma_B=355–540$ МПа; $\delta=19–20\%$; $\psi=38–50\%$, определяемых ГОСТом 26492–85 для прутков BT1-0. Сварка не вызвала значительного

изменения механических свойств. Однако сварка повышает уровень остаточных напряжений, для снижения которых в схеме технологических процессов, включающих сварку, предусмотрен отжиг. Часть образцов перед ААО были подвергнуты отжигу (650°C в течение 2 ч).

К числу параметров аэроакустического воздействия при проведении ААО относятся: температура, скорость охлаждения, скорость потока газа, амплитудно-частотные характеристики, которые регулируются за счет варьирования геометрических характеристик установки, и время термоакустического воздействия. Рабочим газом может быть воздух, азот и другие среды. При проведении ААО может осуществляться воздействие температурных и акустических полей (АТАО) с целью формирования свойств материалов в требуемом направлении или только акустических полей и потока газа — ААО. ААО может быть использована как упрочняющая обработка, так и как обработка, снижающая остаточные напряжения, полученные при предшествующей обработке в материале изделия, и повышающая пластичность, что определяется параметрами режимов обработки [12–16]. Как упрочняющая ААО представляет собой комплексную обработку, включающую предварительную обработку, которой может быть холодная пластическая деформация или термическая обработка с охлаждением в традиционных средах (вода, масло, воздух) или в мощном акустическом поле звукового диапазона частот, при одновременном воздействии потока газа в диапазоне скоростей от десятка до сотен метров в секунду. При этом материал охлаждается до отрицательных температур в расширяющемся потоке газа, т. е. дополнительно реализуется обработка холодом [15, 16]. Одна из основных операций в технологии АТАО — обработка деталей, включающая криогенное воздействие, в мощном акустическом поле звукового диапазона дискретных частот (600–1200 Гц) с уровнем звукового давления до 150–160 дБ в потоке газа в резонаторе газоструйного генератора звука (ГГЗ).

Образцы в исходном состоянии были подвергнуты аэроакустическому воздействию в течение 10 мин при 20°C , без предварительного нагрева, с использованием специального технологического оборудования, включающего ГГЗ. В резонатор ГГЗ устанавливали контейнер с образцами в исходном состоянии и прошедшими отжиг. Обработку образцов проводили в резонаторе ГГЗ по режимам: ААО¹ и ААО², отличающимся амплитудно-частотными характеристиками.

Механические свойства определяли при испытании пятикратных цилиндрических образцов на статическое растяжение по ГОСТ 1497–84

на машине Shimadzu AGX-100кН. Погрешность определения нагрузки при испытаниях не превышает 1%, а напряжения ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{0,2}$) — 5 МПа. В процессе испытаний образцов синхронно записывали диаграммы “нагрузка–деформация” и фиксировали время деформирования материала. Это позволило определить скорость деформации (изменение относительного удлинения (%)) в единицу времени; ее размерность %/с).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты механических испытаний на статическое растяжение образцов из ВТ1-0 в исходном состоянии, после отжига, отжига и обработки по режимам ААО¹ и ААО² приведены в табл. 1.

Разрыв всех образцов происходил вне зоны сварки прутков, что позволяет исключить сварку в качестве фактора, оказывающего значительное влияние на свойства материала. Два образца (№ 7, 9) не разрушились в процессе испытания, так как уровень нагрузки достиг величины, которая ниже уровня чувствительности оборудования, определяющего момент разрушения образца.

Отжиг и обработка по режиму № 3 с ААО¹ существенно не изменяют прочность титана, несколько повышая его пластичность по сравнению с характеристиками в исходном состоянии. Обе характеристики прочности $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{\text{в}}$ снижаются, если после отжига проведена ААО² (режим № 4), более значительно снижается уровень условного предела текучести — $\sigma_{0,2}$, при повышении пластичности. Один из образцов, обработанных по режиму 4 (4/7), не разорвался при испытании на растяжение (значения $\sigma_{\text{в}}$ = 104–120 МПа ниже уровня чувствительности машины). Обработка по режиму № 5 с ААО² без предварительного отжига оказывает на прочность ВТ1-0 влияние аналогичное обработке по режиму № 4; средний уровень $\sigma_{\text{в}}$ = 184 МПа, пластичность несколько меньше, чем при наличии предварительного отжига δ = 31%. При испытании не разорвался образец № 5/9 также из-за низких значений $\sigma_{\text{в}}$. Относительное удлинение (δ) неразорвавшихся образцов определяли по величине равной ΔL в момент снижения напряжения до “0”. Диаграммы растяжения образцов титана после указанных выше обработок представлены на рис. 1.

В отожженном состоянии (рис. 1а, обр. № 2/4) при напряжении выше 400 МПа деформация с 9 до 24% идет при незначительно меняющейся нагрузке (~10–15 МПа), такой вид диаграмм растяжения характерен и для других образцов, прошедших разные виды обработки. При обработке по режиму № 3/5 (ААО¹ после отжига) вид диаграммы практически аналогичен представленному на рис. 1а, так же, как и величина

Таблица 1. Механические свойства образцов (сварка) из титана BT1-0 в исходном состоянии, после отжига и аэроакустической обработки

№ режима/ № образца	Вид обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
1/1	Исходное состояние	337	408	29	63
1/2	Исходное состояние	340	418	33	65
2/3	Отжиг	309	398	34	63
2/4	Отжиг	331	411	31	63
3/5	Отжиг + ААО ¹	310	398	35	64
4/6	Отжиг + ААО ²	172	251	34	63
4/7*	Отжиг + ААО ²	55	119	37*	65
4/		114	185	35	64
5/8	ААО ²	199	282	36	64
5/9*	ААО ²	62	104	28*	60
5/10	ААО ²	75	166	33	64
5/		102	184	31	63

*Образцы не были разрушены в процессе испытания. При отсутствии номера образца приведены средние значения четырех испытаний.

Таблица 2. Влияние режима обработки титана BT1-0 на скорость деформации и параметры диаграммы растяжения

№ режима/ № образца	Вид обработки	σ_B , МПа	V_1^* , %/с	V_2 , %/с	Δ_1^{**} , %	Δ_2 , %	σ_p , МПа
1	Исх. состояние	413	0.41	0.48	15	6	280
2	Отжиг	405	0.52	0.52	15	7	274
3	Отжиг+ ААО ¹	398	0.51	0.52	15	10	272
4/6	Отжиг+ ААО ²	251	0.53	0.54	16	8	120
4/7	Отжиг+ ААО ²	119	1.0	0.5	18	8	—
5/1	Исх. состояние+ ААО ²	283	0.53	0.52	20	7	160
5/2	Исх. состояние+ААО ²	104	0.53	0.52	17	5	—
5/3	Исх. состояние+ААО ²	166	0.52	0.52	21	7	40

* V_1 , V_2 , %/с — скорости деформации образца из титана, соответствующие участкам диаграммы растяжения: 1 — от $\sigma_{0,2}$ до достижения σ_B ; 2 — от σ_B до разрушения или снижения нагрузки до “0”.

** Δ_1 , Δ_2 , % — относительная деформация титана: Δ_1 — в зоне изменения максимальной нагрузки, не превышающего 10 МПа; Δ_2 — при постоянной нагрузке. Образцы 4/7 и 5/2 не разорвались. При отсутствии номера образца приведены средние значения четырех испытаний.

максимального напряжения (σ_B). ААО² с предварительным отжигом — обр. № 4/6 (рис. 1б) существенно уменьшает уровень максимального напряжения при деформации.

После аналогичной обработки — обр. № 4/7 (рис. 1в) максимальное напряжение снижается до 120 МПа, при этом образец не разрушился в процессе испытания. В области деформаций с 12% до 28% этого образца небольшой, ступенчатый рост нагрузки свидетельствует о протекании деформации двойникованием. Обработка ААО² без предварительного отжига (рис. 1г, обр. № 5/10) также снижает максимальное напряжение; образец № 5/9 (рис. 1д) не разрушился в процессе испытания по вышеуказанной

причине; пластичность при этом режиме ниже, чем при режиме обработки, в котором ААО² предшествует отжиг.

Скорость деформации титана в процессе испытания определяли в области пластической деформации: V_1 — от значений $\sigma_{0,2}$ — до достижения условного напряжения σ_B (область поперечного скольжения дислокаций) и V_2 — от уровня значений σ_B (с момента образования шейки в образце) до разрушения или снижения нагрузки до “0”. Величину деформации титана определяли в зонах: Δ_1 — при изменении максимальной нагрузки, не превышающем 10 МПа; Δ_2 — при примерно постоянной нагрузке, результаты приведены в табл. 2.

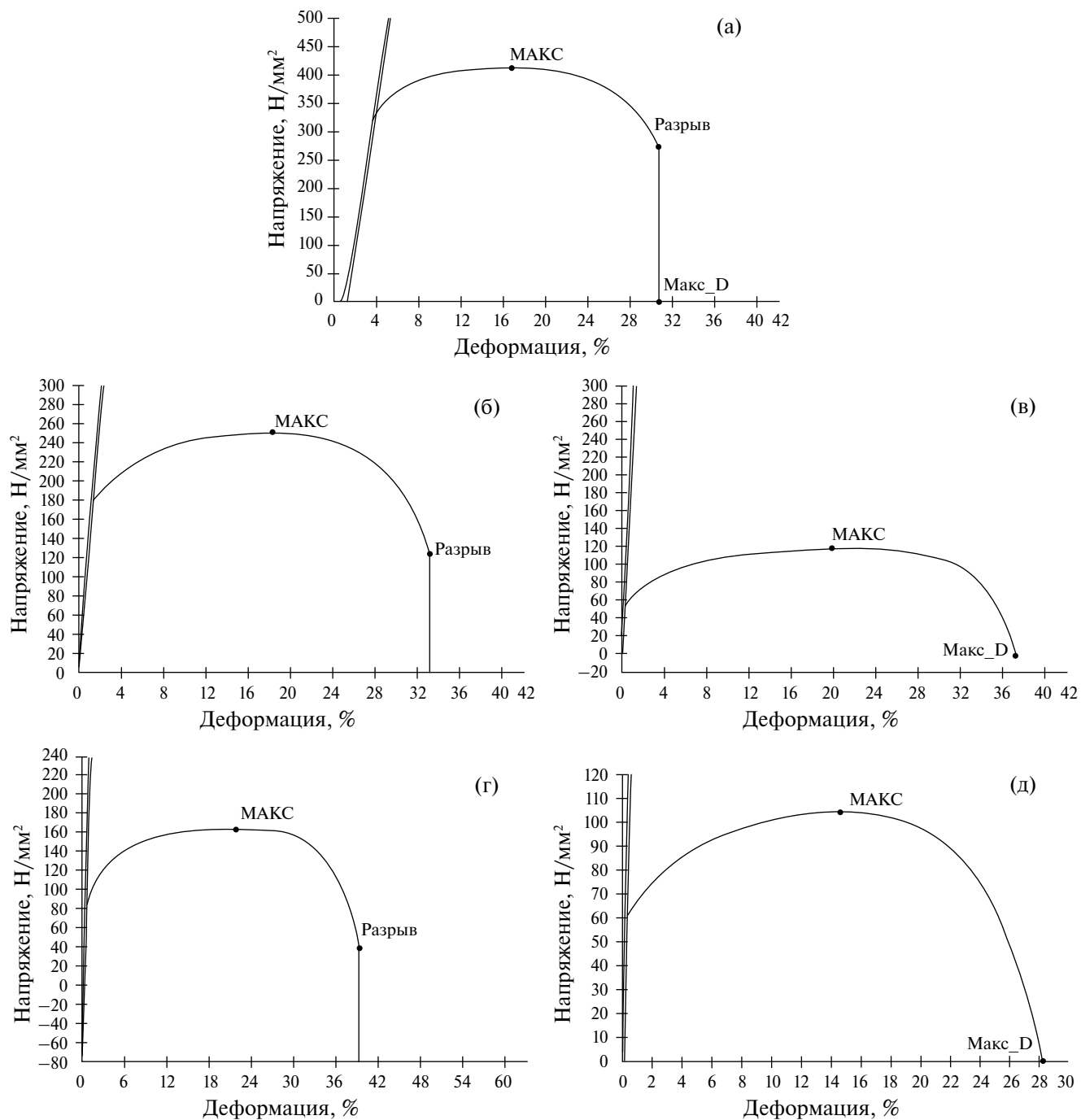


Рис. 1. Диаграммы растяжения образцов титана BT1-0: а – отжиг; б, в – отжиг, ААО²; г, д – ААО² без отжига. Образцы на рис. 1в и д не разорвались.

По сравнению с исходным состоянием после отжига скорость деформации возрастает наиболее интенсивно в области до достижения напряжений $\sigma_B - V_1$ при сохранении значений остальных параметров. ААО¹ после отжига (режим № 3) несколько увеличивает деформацию материала – Δ_2 при постоянной нагрузке.

Более существенное влияние на свойства BT1-0 оказывает обработка ААО² (режимы

№ 4, 5), реализуемая как после отжига, так и в его отсутствии; наряду со значительным снижением σ_B и $\sigma_{0.2}$ возрастает скорость деформации V_1 и величина деформации Δ_1 , а при предварительном отжиге повышаются значения V_2 и Δ_2 . Величина деформации при постоянной нагрузке при обоих видах ААО возрастает. Напряжение, при котором происходит разрыв образца – σ_p , снижается при обработке титана по режимам № 4, 5.

Увеличение скорости деформации и снижение усилия деформации после ААО приводит не только к снижению энергетических затрат, но и повышает ресурс оборудования, в том числе повышая износостойкость деталей оборудования.

В работе [8] исследовали электропластический эффект при растяжении проволоки диаметром 0.8 мм из титана ВТ1-0. Наибольшее снижение прочности от воздействия ЭПЭ для проволоки титана ВТ1-0 было в ее отожженном состоянии и достигало ~200 МПа.

Воздействие аэроакустической обработки (снижение предела прочности с ~410 МПа (исходное состояние) до средних значений ~185 МПа (обработка по режиму № 5)) аналогично по эффективности влиянию ЭПЭ. Следовательно, это позволяет рассматривать аэроакустическую обработку как технологию воздействия на титан ВТ1-0, после проведения которой в процессе пластической деформации наблюдается акустопластический эффект – АПЭ.

В металлах с высокой энергией дефектов упаковки, к которым относится титан, в процессе деформации образуются плоские скопления дислокаций. На стадии множественного скольжения в результате пересечения дислокаций разных систем образуются барьеры, дислокации тормозятся у них. При высокой энергии дефектов упаковки поперечное скольжение происходит легко. Скопления дислокаций будут обходить барьеры и вновь взаимодействовать с дислокациями других систем и образовывать новые барьеры.

В процессе проведения ААО производилось многоциклическое комплексное воздействие на металл нестационарного потока газа и дискретных акустических полей с частотой 0.4–2.0 кГц, под влиянием которых предположительно происходит отрыв дислокаций от барьеров, увеличение подвижности дислокаций, определяющее снижение прочности, повышение пластичности и снижение внутренних напряжений [12–16].

Авторами ранее исследовалось влияние ААО на величину остаточных напряжений (ОН) в сплаве ВТ23. Максимальный уровень растягивающих ОН на поверхности в исходном состоянии достигал 400 МПа, снижаясь до 300 МПа на глубине 700 мкм, и далее не изменялся. После ААО величина ОН в сплаве уменьшилась до 230 МПа на поверхности. Отжиг снижает ОН на поверхности титана ВТ1-0 с 1035 МПа до 942 МПа. Следовательно, можно предположить, что ААО также снижает и величину ОН в титане ВТ1-0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аэроакустическая обработка (ААО) титана ВТ1-0, оказывает существенное влияние на его механические и технологические свойства.

После ААО увеличивается относительное удлинение, падает временное сопротивление и условный предел текучести. Это снижает усилия деформации, увеличивает скорость деформации, т. е. наблюдается акустопластический эффект. Эффективность АПЭ аналогична электропластическому эффекту (ЭПЭ) для проволоки из ВТ1-0. Отжиг перед ААО² дополнительно увеличивает пластичность титана. Преимуществом ААО является то, что обработка проводится до пластической деформации при 20°C, и следовательно не требуется разработки специальной установки для деформации сплавов, которая необходима для достижения ЭПЭ при деформировании металлов.

Кроме того, увеличение скорости деформации и снижение усилия деформации приводит не только к снижению энергетических затрат, но и повышает ресурс оборудования, в том числе повышая износостойкость деталей штампов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00338, (<https://rscf.ru/project/24-29-00338/>).

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн М.Л., Пустовойт В.Н. Термическая обработка стальных изделий магнитном поле. М.: Машиностроение, 1987. 255 с.
2. Шляров В.В., Загуляев Д.В., Серебрякова А.А. Анализ изменения микротвердости, скорости ползучести и морфологии поверхности разрушения титана ВТ1-0, деформируемого в условиях действия постоянного магнитного поля 0.3 Тл // *Frontier Mater. Techn.* 2022. № 1. С. 91–100.
3. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Термодинамический анализ магнитоэлектрических эффектов в “немагнитных” металлах // *Труды ВИАМ электрон. науч.-технич. журн.* 2018. № 12. С. 79–87.
4. Skvortsov A.A., Morgunov R.B., Pshonkin D.E., Piskorskii V.P., Valeev R.A. Magnetic Memory in Plasticity of an Aluminum Alloy with Iron Inclusions // *Physics of the Solid State.* 2019. V. 61. № 6. P. 1023–1029.
5. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / Под общей редакцией О. В. Абрамова и В. М. Приходько. М.: Янус-К, 2006. 688 с.
6. Сапожников К.В., Кустов С.Б. Микроструктурные механизмы акустопластического эффекта в кристаллах // *Вестник ТГУ.* 2000. Т. 5. Вып. 2–3. С. 198–199.
7. Панин А.В., Панин В.Е., Почивалов Ю.И., Клименков В.А., Чернов И.П., Валиев Р.З., Казаченок М.С., Сон А.А. Особенности локализации деформации и механического поведения титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях // *Физич. мезомеханика.* 2002. № 5. С. 73–84.

8. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.
9. Тимченко С.Л., Кобелева Л.И., Задорожный Н.А. Влияние электрического тока на структуру и свойства алюминиевого сплава // Физика и химия обр. материалов. 2011. № 6. С. 82–87.
10. Пономарев Т.С., Белявин К.Е., Минько Д.В., Узурчиев У.Х., Столяров В.В. Электропластический эффект при растяжении титановой проволоки / Перспективные материалы и технологии. Сборник трудов международного симпозиума. Витебск, 2019. 716 с.
11. Li X., Wang F., Tang G., Zhu J. Improvement of formability of Mg-3Al-1Zn alloy strip by electroplastic-differential speed rolling // Mater. Sci. Eng. 2014. V. A 618. P. 500–504.
12. Воробьева Г.А., Усков В.Н. Аэротермоакустическая обработка сталей и сплавов. СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-т, 2012. С. 132.
13. Воробьева Г.А., Складнова Е.Е., Ремшев Е.Ю. Конструкционные стали и сплавы. СПб.: Политехника, 2023. 440 с.
14. Lenina V.A., Vorobyova G.A., Remshev E.Yu. Analysis of factors determining aspects of deformation and hardening of bronze BRNHK2.5–0.7–0.6 // Metallurgist. 2022. V. 66. P. 1–11.
15. Ленина В.А., Воробьева Г.А., Ремшев Е.Ю., Расулов З.Н. Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств сплава БрНХК2.5-0.7-0.6 при термической и аэротермоакустической обработках // Вестник Машиностроения. 2021. № 8. С. 71–75.
16. Ремшев Е.Ю., Воробьева Г.А., Калугина М.С., Афицын Г.О. Формирование свойств титановых сплавов мартенситного и псевдо- β -классов при применении аэротермоакустической обработки // Титан. 2020. № 3–4 (69). С. 48–55.

STUDY OF THE INFLUENCE OF ACOUSTIC FIELDS ON THE MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF TITANIUM VT1-0

E. Y. Remshev^{1,*}, G. A. Vorob'eva¹, A. I. Olekhver¹, and T. M. Abu Fadda¹

¹BSTU "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, 190005 Russia

*e-mail: remshev@mail.ru

The effect of aeroacoustic treatment (AAT) on the mechanical and technological properties of titanium VT1-0 is investigated. The dependence of the strength and ductility characteristics on the type of preliminary titanium treatments has been established: annealing, AAT and only AAT before plastic deformation significantly reduce the value of σ_b and increase plasticity, which reduces deformation forces, increases the deformation rate. The effect of pre-treatment on the process of plastic deformation of VT1-0 (a decrease in strength by ~ 200 MPa) is similar in terms of the effect of the electroplastic effect (EPE) on the strength of the wire from VT1-0.

Keywords: titanium VT1-0, heat treatment, aeroacoustic treatment, plastic deformation, electroplastic effect