



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.73  
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-120-127

## ПОЛУЧЕНИЕ ГИБРИДНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ4-1 ГОРЯЧЕЙ ОСАДКОЙ С КРУЧЕНИЕМ

Петров П.А.<sup>1</sup>, Бурлаков И.А.<sup>1,2</sup>, Нгуен Хань Тоан<sup>1</sup>, Во Фан Тхань Дат<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup> Производственный комплекс «Салют» АО «ОДК», Москва, Россия

**Аннотация.** В статье рассмотрены результаты экспериментального исследования качества соединения двух однородных заготовок, изготовленных из титанового сплава ОТ4-1. С применением метода осадки с кручением получено неразъемное соединение за счет пластической деформации. Соединение обеспечивается при температуре 600°C. Условием формирования соединения между заготовками является отсутствие проскальзывания между торцом каждой заготовки и инструментом. Осадка с кручением выполнена на модернизированном гидравлическом прессе модели ДБ-2432 силой 1,6 МН. Приведены результаты натуральных экспериментов по формообразованию гибридной заготовки из титанового сплава ОТ4-1, а также результаты компьютерного моделирования осадки с кручением гибридной заготовки, показана зависимость относительного удлинения образцов сплава от температуры и распределение микротвердости по сечению гибридного образца после осадки с кручением при выбранном режиме деформирования. Натурные эксперименты, выполненные по разным режимам, позволили выбрать режим формообразования осадкой с кручением гибридной заготовки. Выбранный режим характеризуется деформированием пакета из двух заготовок при температуре 600°C в штампе, подогретом до 300°C. Установлено, что выбранный режим формообразования с нагревом заготовок и подогревом штампового инструмента обеспечивает надежное соединение заготовок с высоким качеством. Для подтверждения качества соединения двух однородных образцов сплава ОТ4-1 выполнено металлографическое исследование. Результаты металлографии, полученные при увеличении  $\times 2500$  и  $\times 5000$  зоны соединения, подтверждают надежность сформированного соединения. Полученные результаты могут быть применены при разработке методики проектирования технологического процесса горячей объемной штамповки поковок из гибридной заготовки.

**Ключевые слова:** титановый сплав ОТ4-1, гибридные заготовки, осадка с кручением, формообразование с нагревом, микроструктуры, неразъемное соединение пластической деформацией

© Петров П.А., Бурлаков И.А., Нгуен Хань Тоан, Во Фан Тхань Дат, 2024

### Для цитирования

Получение гибридных заготовок из титанового сплава ОТ4-1 горячей осадкой с кручением / Петров П.А., Бурлаков И.А., Нгуен Хань Тоан, Во Фан Тхань Дат // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 120-127. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-120-127>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## PRODUCING HYBRID WORKPIECES FROM TITANIUM ALLOY OT4-1 BY HOT UPSETTING WITH TORSION

Petrov P.A.<sup>1</sup>, Burlakov I.A.<sup>1,2</sup>, Nguyen Khanh Toan<sup>1</sup>, Vo Phan Thanh Dat<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Production Complex Salyut, JSC United Engine Corporation, Moscow, Russia

**Abstract.** The article discusses the results of an experimental study on the quality of joining two homogeneous workpieces made of titanium alloy OT4-1. Using the method of upsetting with torsion, a permanent joint was achieved due to plastic deformation. Joining is ensured at a temperature of 600°C. The condition for forming the connection between the workpieces is no sliding between the end of each workpiece and the die. Upsetting with torsion was carried out using a modernized hydraulic press model DB-2432 with a force of 1.6 MN. The article contains results of full-scale experiments on the formation of a hybrid workpiece from titanium alloy OT4-1, as well as the results of computer simulation of upsetting with torsion of the hybrid workpiece, the dependence between relative elongation of alloy samples and temperature, and the distribution of microhardness over the cross section of the hybrid sample after upsetting with torsion in the selected deformation mode. The full-scale experiments carried out in different modes contributed to selecting the mode of forming the hybrid workpiece by upsetting with torsion. The selected mode is characterized by the deformation of a package of two workpieces at a temperature of 600°C between the dies heated to 300°C. It has been established that the selected forming mode with heating of workpieces and heating of the forging tool ensures a reliable joining of workpieces with a high quality. To verify the quality of the joining of two homogeneous samples of the OT4-1 alloy, the authors performed a metallographic study. The metallographic results obtained at magnifications of  $\times 2500$  and  $\times 5000$  of the joint area confirm reliability of the formed joint. The results obtained can be applied in developing a methodology for designing a technological process for hot die forging of forgings from a hybrid workpiece.

**Keywords:** titanium alloy OT4-1, hybrid workpieces, upsetting with torsion, forming with heating, microstructures, permanent joint due to plastic deformation

### For citation

Petrov P.A., Burlakov I.A., Nguyen Khanh Toan, Vo Phan Thanh Dat. Producing Hybrid Workpieces from Titanium Alloy OT4-1 by Hot Upsetting with Torsion. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 120-127. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-120-127>

### Введение

В промышленности в последнее время начинают широко применять так называемые гибридные заготовки, представляющие собой металлический лист, изготовленный из однородных либо разнородных материалов, отличающихся по прочности, маркам и толщине. Использование таких заготовок дает возможность учесть особенности работы готовой детали и, как следствие, такого подхода получать облегченные и экономичные детали. Существует ряд методов получения гибридных заготовок, таких как сварка лазерным лучом [1, 2], электронно-лучевая сварка [3], электродная сварка [4, 5] и сварка трением с перемешиванием (Friction-Stir Welding, FSW) [5-7]. Каждый из упомянутых методов имеет свои преимущества и недостатки.

Одной из малоизученных технологий пластического формоизменения, позволяющей изготавливать тонкостенные осесимметричные поковки, является штамповка (осадка) с кручением [8, 9]. Суть процесса заключается в формообразовании гибридной заготовки вращающимися друг относительно друга бойками. Ось вращения бойков совпадает с осью осаживаемой

заготовки. За счет сил трения на контактной поверхности крутящий момент передается деформируемым заготовкам и производит их диффузионное соединение. В результате приложения к заготовке наряду с осевой силой крутящего момента возникает сложная схема напряженно-деформированного состояния, обеспечивающая, как показали металлографические исследования, практически 100%-й контакт свариваемых заготовок [10]. Анализ отечественной и зарубежной информации позволил установить, что многие технологические важные параметры процесса осадки с кручением недостаточно изучены. В частности, отсутствуют данные о возможности формообразования гибридных заготовок из титановых сплавов, в частности сплава OT4-1, характеризующегося относительно низкими пластическими свойствами.

Целью настоящей работы являлось получение надежного соединения заготовок из титанового сплава OT4-1 осадкой с кручением с изучением микроструктуры в зоне их контакта. Для достижения поставленной цели необходимо было выбрать исследуемый материал, определить распределение температуры в процессе деформации, найти зависимость относительного

удлинения образцов из сплава ОТ4-1 от температуры, определить рациональный режим нагрева заготовок и инструмента, определить свойства полученных гибридных заготовок методом изучения микроструктуры образцов в меридиональном сечении.

**Материалы и методы исследования**

В качестве исследуемого материала был выбран титановый сплав ОТ4-1. Образцы для исследования выбраны следующих размеров: 1) диаметр ( $D_0$ ) 18 мм и высота ( $H_0$ ) 18 мм; 2) диаметр 40 мм и высота 10 мм. Все образцы были изготовлены методом электроэрозионной резки. Соотношение  $\lambda = H_0 / D_0$  у исходных образцов различно и составляло соответственно: 1)  $\lambda = 1,0$ ; 2)  $\lambda = 0,25$ .

Пакет из двух образцов собирался в соответствии со схемой, показанной на рис. 1. За счет осевой нагрузки  $P$  обеспечивается уменьшение высоты заготовки и увеличение её диаметра; за счет радиальной нагрузки – крутящего момента  $M$  – дополнительное увеличение диаметра заготовки. В результате на поверхности контакта двух исходных заготовок (поверхность А) (см. рис. 1) происходит формирование неразъемного соединения пластической деформацией. Для предотвращения проскальзывания на контактной поверхности инструмента с торцом каждой заготовки в пакете начальное значение силы  $P$  установлено равным 0,8 МН ( $\approx 160$  атм).

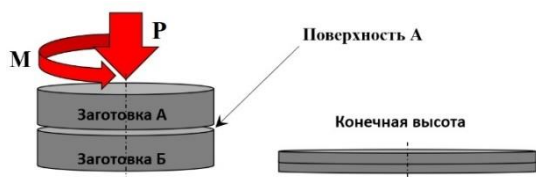
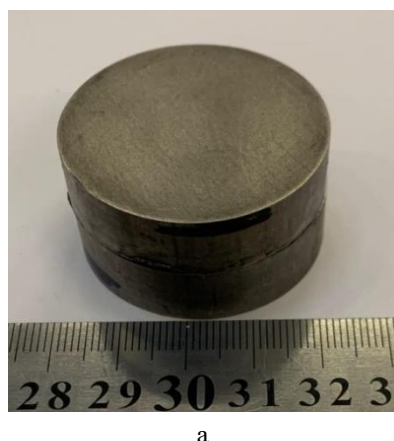


Рис. 1. Схема процесса осадки с кручением составной заготовки

Fig. 1. Scheme of upsetting hybrid workpiece with torsion



а



б

Рис. 2. Заготовка из титанового сплава ОТ4-1 до (а) и после (б) осадки с кручением при комнатной температуре (толщина пакета 5,2 мм)

Fig. 2. The workpiece from titanium alloy OT4-1 before (a) and after (б) upsetting with torsion at room temperature (package thickness is 5.2 mm)

Осадку пакета из двух образцов с кручением осуществляли на модернизированном гидравлическом прессе модели ДБ-2432 силой 1,6 МН со скоростью осевого перемещения пуансона 1 мм/с при частоте его вращения 12 об/мин [8]. Соотношение  $\lambda_n = H_n / D_n$  пакетов, полученных после совмещения заготовок до начала осадки с кручением, составляло соответственно: 1)  $\lambda_n = 0,72$ ; 2)  $\lambda_n = 0,5$ . В зависимости от температуры нагрева пакета и инструмента, а также соотношения исходных размеров заготовок ( $\lambda$ ), составляющих пакет, его деформация выполнялась до размера 2,79 и 5,2 мм.

Контактные поверхности образцов перед деформацией тщательно зачищались и протирались спиртом. Для изучения микроструктуры и микротвердости осажённые образцы разрезались в меридиональной плоскости с применением метода электроэрозии и исследовались с применением бинокулярного микроскопа «Olympus Delta» с увеличением  $\times 100$ ,  $\times 500$ ,  $\times 1000$  и  $\times 2500$  и твердомера «DuraScan 20» и электронного микроскопа «FEI Quanta 650» с увеличением  $\times 5000$ . Замеры микротвердости по Виккерсу были проведены на приборе «LEICA МНТ-10» с нагрузкой на индентор 100 г.

**Экспериментальные исследования**

В натурном эксперименте исследовано несколько режимов, позволивших выбрать рациональный для формирования неразъемного соединения между заготовками по схеме осадки с кручением (см. рис. 1). В процессе деформации пакета из двух заготовок диаметром 40 мм и высотой 10 мм каждая ( $\lambda = 0,25$ ,  $\lambda_n = 0,5$ ), выполненной при комнатной температуре с применением холодного инструмента, произошло разрушение заготовок в периферийной области (рис. 2).

В процессе деформации пакета из двух заготовок диаметром 18 мм и высотой 18 мм каждая ( $\lambda = 1,00$ ,  $\lambda_{\text{п}} = 0,72$ ), выполненной при температуре 600°C с применением нижнего инструмента (неподвижного), подогретого до температуры 300°C, сформирована составная заготовка толщиной 2,79 мм (рис. 3). В этом случае до выполнения сжатия с кручением исходные заготовки диаметром 18 мм и высотой 18 мм

предварительно осаживались между плоскими плитами при температуре 600°C (рис. 3, а). Каждая из заготовок сжималась до высоты  $\approx 9$  мм.

Для изучения микроструктуры полученные заготовки разрезались в меридиональной плоскости методом электроэрозии. Результат представлен на рис. 4. Видно, что несмотря на разрушение в крае, есть соединение в центре зоны соединения.



а



б

Рис. 3. Заготовка из титанового сплава ОТ4-1 до (а) и после (б) осадки с кручением при температуре 600°C  
 Fig. 3. The workpiece from titanium alloy OT4-1 before (a) and after (б) upsetting with torsion at 600°C



а



б

Рис. 4. Микроструктура гибридного образца из сплава ОТ4-1 в центре зоны соединения с увеличением  $\times 100$  (а) и  $\times 500$  (б)  
 Fig. 4. Microstructure of a hybrid sample from the OT4-1 alloy in the center of the joint zone magnified at  $\times 100$  (a) and  $\times 500$  (б)

Титановый сплав ОТ4-1 относится к группе сплавов повышенной пластичности, однако при комнатной температуре она редко превышает 20%. Как видно из графика зависимости относительного удлинения образцов из сплава ОТ4-1, полученного анализом литературных и собственных данных (рис. 5), пластичность материала начинает резко увеличиваться при 600°C и выше. Поэтому пакет из двух исходных заготовок предварительно нагревали в печи до 650°C с учетом падения температуры при переносе заготовок в штамп, подогретый до температуры 300°C. При этом в начальный момент контакта верхнего инструмента с верхней заготовкой создавалось давление, эквивалент-

ное силе 1 МН, что обеспечивало отсутствие проскальзывания между торцом каждой заготовки и инструментом (верхним вращающимся и нижним неподвижным).

Осадка в рассмотренных условиях позволила получить заготовки с хорошим качеством соединения (рис. 6).

Если исходная заготовка имела равноосные  $\alpha$ -зерна размером 10-15 мкм (рис. 7), то, как видно на рис. 8, в зоне контакта наблюдается интенсивное измельчение зерен, и структура представляет собой механическую смесь, вблизи зоны контакта микроструктура начинает укрупняться и постепенно переходит в структуру основного материала.

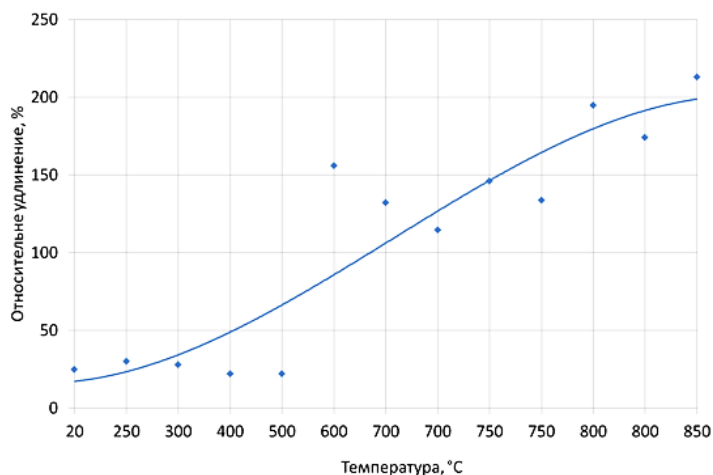


Рис. 5. Зависимость относительного удлинения образцов из сплава ОТ4-1 от температуры  
 Fig. 5. The dependence between relative elongation of the samples from alloy OT4-1 and temperature

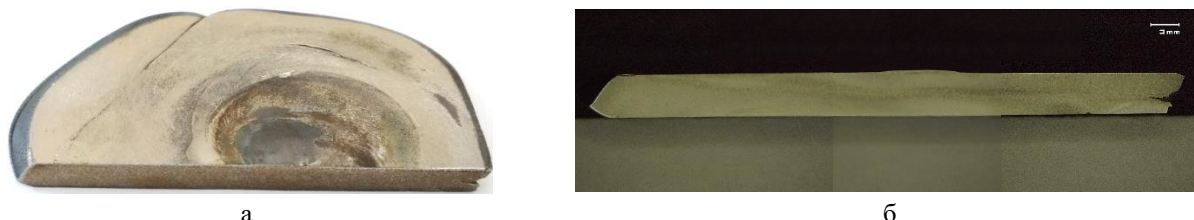


Рис. 6. Гибридная заготовка (половина от целой) из сплава ОТ4-1, полученная осадкой с кручением (а) при температуре заготовок 600°C и скорости вращения верхнего инструмента 12 об/мин и ее сечение (б)  
 Fig. 6. The hybrid workpiece (half of a full one) from alloy OT4-1 produced by upsetting with torsion (a) at 600°C and an upper die velocity of 12 rpm and its cross section (б)



Рис. 7. Структура исходного образца сплава ОТ4-1 при температуре 20°C до нагрева под проведение осадки с кручением, увеличение  $\times 100$   
 Fig. 7. The structure of the initial sample of alloy OT4-1 at 20°C before its heating for upsetting with torsion,  $\times 100$  magnification

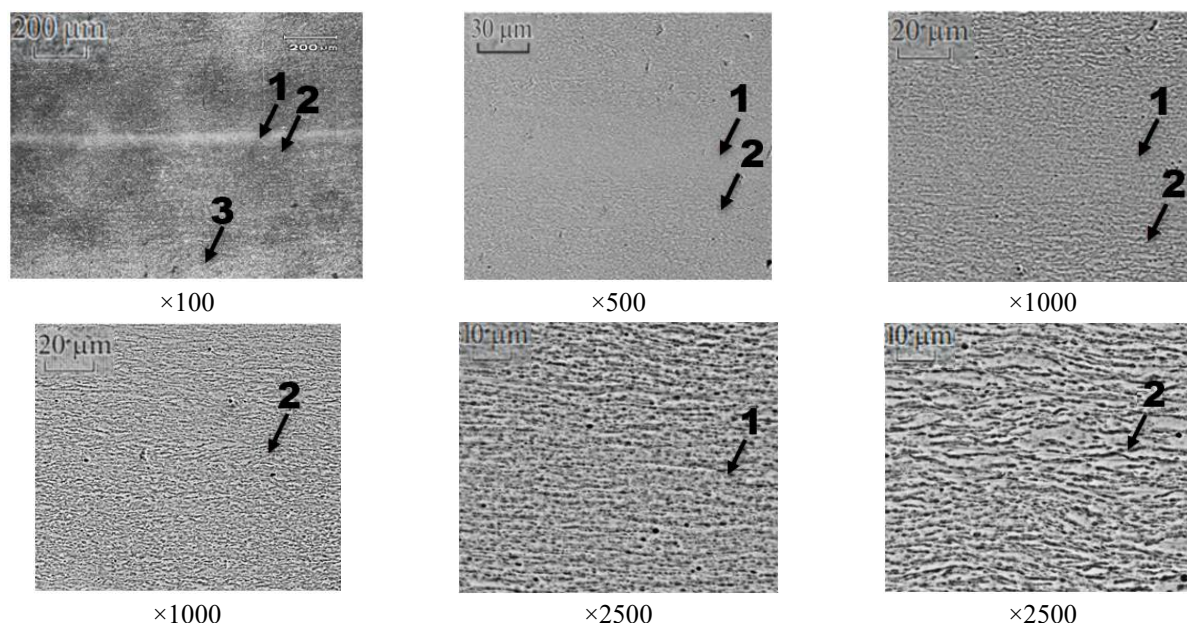


Рис. 8. Микроструктура в меридиональном сечении гибридного образца из сплава ОТ4-1 после его осадки с кручением при температуре 600°C и скорости вращения верхнего инструмента 12 об/мин:

1 – зона соединения; 2 – вблизи зоны соединения; 3 – зона основного металла

Fig. 8. Microstructure in the meridional section of the hybrid sample from the OT4-1 alloy produced by upsetting with torsion at 600°C and an upper die velocity of 12 rpm: 1 is a joining zone; 2 is near the joining zone; 3 is a base metal zone

Металлографическое исследование зоны соединения на электронном микроскопе указывает на отсутствие различия микроструктуры вблизи зоны контакта и в зоне соединения, что подтверждает его высокое качество (рис. 9).

Изучение влияния осадки с кручением на изменение микротвердости по Виккерсу проведено для центральной части гибридного образца (рис. 10, а). Результаты металлографического исследования показали, что микротвердость незначительно изменяется по высоте образца. Замер микротвердости проводился от поверхности к сердцевине образца, в которой расположена зона соединения (см. рис. 8, ×100). Шаг замера микротвердости от поверхности к сердцевине образца составил 0,2 мм. Наблюдается незначительное повышение значения микротвердости у поверхности и в центральной зоне (рис. 10, б).

#### Закключение

1. Настоящая работа показала, что использование горячего формоизменения позволяет существенно расширить область применения процесса осадки с кручением за счет применения ее для пластической обработки труднодеформируемых материалов.

2. Применение найденной зависимости относительного удлинения образцов из сплава ОТ4-1 от температуры позволило определить температурный режим нагрева заготовок и инструмента и получить гибридные заготовки из титанового сплава ОТ4-1 с хорошим качеством соединения, подтвержденное исследованием микроструктуры в меридиональном сечении образца.

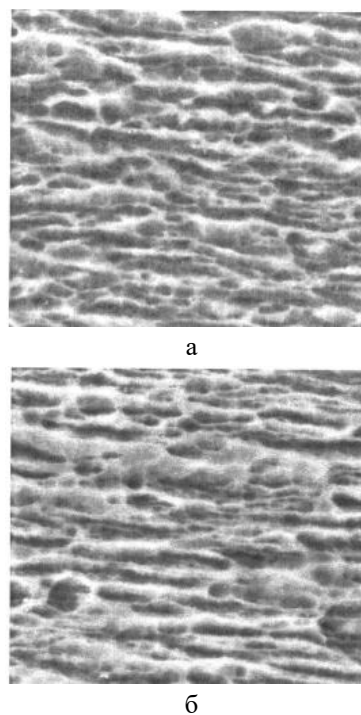
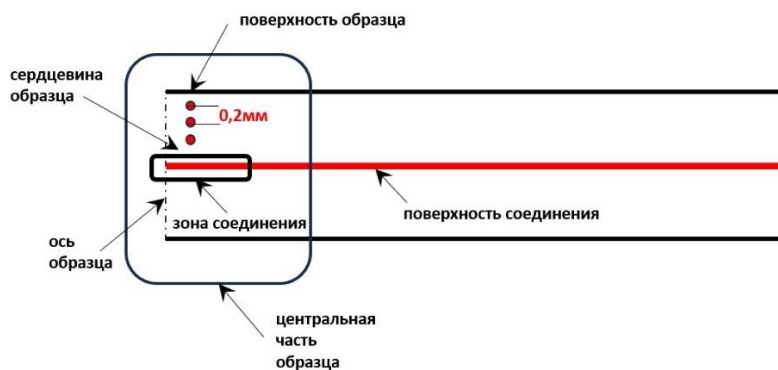
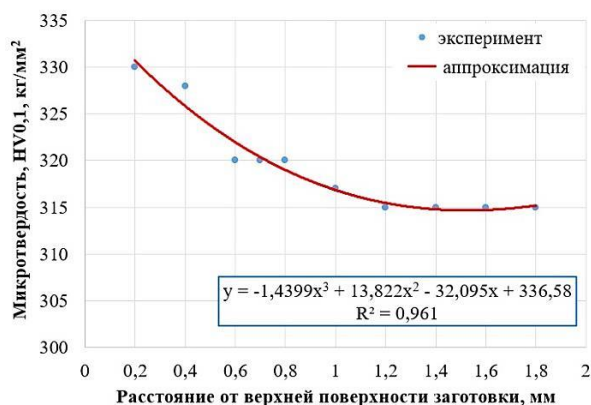


Рис. 9. Микроструктура зоны соединения (а) и вблизи соединения (б) (см. зоны 1 и 2 на рис. 8, ×100) в гибридном образце, полученная на электронном микроскопе, ×5000

Fig. 9. Microstructure of the joining zone (a) and near the joining zone (б) (see zone 1 and 2 in Fig. 8, ×100) in the hybrid sample obtained with SEM, ×5000



а



б

Рис. 10. Распределение микротвердости по толщине гибридного образца в центральной зоне (а) и график распределения микротвердости (б)  
 Fig. 10. Distribution of microhardness over thickness of the hybrid sample in the central zone (a) and the microhardness distribution curve (b)

**Список источников**

1. Xiao Rongshi, Zhang Xinyi. Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys // Journal of Manufacturing Processes. 2014, vol. 16, no. 2, pp. 166-175.
2. Kashaev N., Ventzke V., Çam G. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications // Journal of Manufacturing Processes. 2018, vol. 36, pp. 571-600.
3. Slobodyan M. Resistance, electron- and laser-beam welding of zirconium alloys for nuclear applications: A review, Nuclear Engineering and Technology. 2021, vol. 53, iss. 4, pp. 1049-1078. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.005>.
4. Kang Zhou, Ping Yao. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019, vol. 124, no. 1, pp. 170-198.
5. Singh V.P., Patel S.K., Ranjan A., Kuriachen B. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium-magnesium alloys: a critical review // Journal of Materials Research and Technology. 2020, vol. 9, no. 3, pp. 6217-6256.
6. Fengxiang Xu, Guangyong Sun, Guangyao Li, Qing

- Li, Experimental investigation on high strength steel (HSS) tailor-welded blanks (TWBs) // Journal of Materials Processing Technology. 2014, vol. 214, pp. 925-935.
7. Joining by plastic deformation / Mori K., Bay N., Fratini L., Micari F., Tekkaya A.E. // CIRP Annals. 2013, vol. 62, no. 2, pp. 673-694.
8. Штамповка с кручением: монография / Субич В.Н., Демин В.А., Шестаков Н.А., Власов А.В. М.: МГИУ, 2008. 389 с.
9. Носков Ф.М., Квеглис Л.И., Лесков М.Б. Структурообразование в зоне контакта металлов при совместной пластической деформации: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. 200 с.
10. Петров П.А., Бурлаков И.А., Нгуен Хань Тоан. Перспективы применения гибридных заготовок в машиностроении // Технология металлов. 2021. №8. С. 10-23.

**References**

1. Xiao Rongshi, Zhang Xinyi. Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys. Journal of Manufacturing Processes. 2014;16(2):166-175.
2. Kashaev N., Ventzke V., Çam G. Prospects of laser

- beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;36:571-600.
- Slobodyan M. Resistance, electron- and laser-beam welding of zirconium alloys for nuclear applications: A review. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021;53(4):1049-1078. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.005>
  - Kang Zhou, Ping Yao. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019;124(1):170-198.
  - Singh V.P., Patel S.K., Ranjan A., Kuriachen B. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium-magnesium alloys: a critical review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(3):6217-6256.
  - Fengxiang Xu, Guangyong Sun, Guangyao Li, Qing Li, Experimental investigation on high strength steel (HSS) tailor-welded blanks (TWBs). *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214:925-935.
  - Mori K., Bay N., Fratini L., Micari F., Tekkaya A.E. Joining by plastic deformation. *CIRP Annals*. 2013;62(2):673-694.
  - Subich V.N., Demin V.A., Shestakov N.A., Vlasov A.V. *Shtampovka s krucheniem: monografiya* [Die forging with torsion: monograph]. Moscow: Moscow State Industrial University, 2008, 389 p. (In Russ.)
  - Noskov F.M., Kveglis L.I., Leskov M.B. *Strukturoobrazovanie v zone kontakta metallov pri sovmestnoy plasticheskoy deformatsii: monografiya* [Structure formation in the contact zone of metals during joint plastic deformation: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2019, 200 p. (In Russ.)
  - Petrov P.A., Burlakov I.A., Nguyen Khanh Toan. Prospects of applying hybrid workpieces in the mechanical engineering industry. *Tekhnologiya metallov* [Technology of Metals]. 2021;(8):10-23. (In Russ.)

Поступила 05.12.2023; принята к публикации 09.03.2024; опубликована 27.06.2024  
Submitted 05/12/2023; revised 09/03/2024; published 27/06/2024

**Петров Павел Александрович** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработка материалов давлением и аддитивные технологии, Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: petrov\_p@mail.ru.

**Бурлаков Игорь Андреевич** – главный специалист производственного комплекса «Салют» АО «ОДК», Москва, Россия. Email: i.burlakov@uecrus.com.

**Нгуен Хань Тоан** – аспирант кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: tolya.vn229@gmail.com.

**Во Фан Тхань Дат** – аспирант кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: vodat2996@gmail.com.

**Pavel A. Petrov** – PhD (Eng.), Professor, Head of the Department of Material Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: petrov\_p@mail.ru.

**Igor A. Burlakov** – Chief Specialist, Production Complex Salyut, JSC United Engine Corporation, Moscow, Russia. Email: i.burlakov@uecrus.com.

**Nguyen Khanh Toan** – postgraduate student of the Department of Material Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: tolya.vn229@gmail.com.

**Vo Phan Thanh Dat** – postgraduate student of the Department of Material Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: vodat2996@gmail.com.