Баяндин Ю.В., Дудин Д.С., Ильиных А.В., Пермяков Г.Л., Чудинов В.В., Келлер И.Э., Трушников Д.Н. Характеристики прочности и пластичности ряда металлических сплавов и нержавеющих сталей, созданных проволочно-дуговой наплавкой, в широком диапазоне скоростей деформаций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 1. С. 33–45. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.04

Bayandin Yu.V., Dudin D.S., Ilyinykh A.V., Permyakov G.L., Chudinov V.V., Keller I.E., Trushnikov D.N. Strength and ductility characteristics of metal alloys and stainless steels created by wire-arc surfacing in a wide range of strain rates. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 1, pp. 33-45. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.04

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 1, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.04
УДК 539.374+621.791.927.55+620.172.2+620.178.73

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ РЯДА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ И НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ, СОЗДАННЫХ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ, В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ

Ю.В. Баяндин[1,2], Д.С. Дудин[1,2], А.В. Ильиных[1], Г.Л. Пермяков[1], В.В. Чудинов[2], И.Э. Келлер[1,2], Д.Н. Трушников[1]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
[2]Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 10 ноября 2022 г.
Одобрена: 20 марта 2023 г.
Принята к публикации:
05 апреля 2023 г.

Ключевые слова:

аддитивное производство, проволочно-дуговая наплавка, послойная проковка, алюминиевые сплавы, титановые сплавы, аустенитные нержавеющие стали, статические испытания, динамические испытания.

АННОТАЦИЯ

Для выбора рациональных параметров процесса гибридного аддитивного производства конструкций из конструкционных металлических сплавов и нержавеющих сталей определялись механические характеристики, способные служить показателями качества материала. Использованы самые прогрессивные технологии аддитивного производства проволочно-дуговой наплавкой (плазменной, плазменно-дуговой с плавящимся электродом, в том числе с холодным переносом металла) с послойной проковкой пневматическим ударным инструментом и последующей термообработкой. Исследованы алюминиево-магниевый сплав АМг5, титановый сплав ВТ6, аустенитные нержавеющие стали 12Х18Н10Т и AISI 308LSi. Из созданных аддитивным производством заготовок вырезаны образцы – лопатки для стандартных испытаний на статическое одноосное растяжение и цилиндры для высокоскоростных испытаний на сжатие методом Кольского на разрезном стержне Гопкинсона. По зарегистрированным и обработанным кривым «напряжение – деформация» для всех материалов определялись стандартные характеристики прочности и пластичности и закон деформационного и скоростного упрочнения Джонсона – Кука. Для корректной оценки механических свойств аддитивно произведенных материалов указанные испытания также проводились для каждого из них в виде отожженного проката. Установлено, что для сравнения эффективности различных технологических параметров аддитивного производства целесообразно использовать статический предел прочности и равномерное удлинение до разрыва, имеющие наименьший статистический разброс. Также была найдена приемлемой аппроксимация законом Джонсона – Кука деформационных кривых каждого из исследуемых материалов по осредненным данным, включающим различные технологические режимы. Определенные механические характеристики представляются необходимыми для поиска эффективных режимов гибридного аддитивного производства и численного расчета различных упругопластических задач в динамической постановке для исследованных материалов для конструкторских и технологических нужд.

© ПНИПУ

© **Баяндин Юрий Витальевич** – к.ф.-м.н., с.н.с., e-mail: buv@icmm.ru.
Дудин Дмитрий Сергеевич – асп., e-mail: dmitryovj@yandex.ru.
Ильиных Артём Валерьевич – к.т.н., с.н.с., e-mail: ilinih@yandex.ru.
Пермяков Глеб Львович – к.т.н., н.с., 29, e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru.
Чудинов Василий Валерьевич – инж., e-mail: chudinov@icmm.ru.
Келлер Илья Эрнстович – д.ф.-м.н., доц., e-mail: kie@icmm.ru.
Трушников Дмитрий Николаевич – д.т.н., проф., e-mail: trdimitr@yandex.ru.

Yuriy V. Bayandin – CSc of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, e-mail: buv@icmm.ru.
Dmitry S. Dudin – PhD- student, e-mail: dmitryovj@yandex.ru.
Artem V. Il'inykh – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: ilinih@yandex.ru.
Gleb L. Permyakov – CSc in Technical Sciences, Researcher, e-mail: gleb.permyakov@yandex.ru.
Vasiliy V. Chudinov – Engineer, e-mail: chudinov@icmm.ru.
Ilya E. Keller – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: kie@icmm.ru.
Dmitry N. Trushnikov – Doctor of Technical Sciences, e-mail: trdimitr@yandex.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

STRENGTH AND DUCTILITY CHARACTERISTICS OF METAL ALLOYS AND STAINLESS STEELS CREATED BY WIRE-ARC SURFACING IN A WIDE RANGE OF STRAIN RATES

Yu.V. Bayandin[1,2], D.S. Dudin[1,2], A.V. Ilyinykh[1], G.L. Permyakov[1], V.V. Chudinov[2], I.E. Keller[1,2], D.N. Trushnikov[1]

[1]Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
[2]Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 10 November 2022
Approved: 20 March 2023
Accepted for publication: 05 April 2023

Keywords:
additive manufacturing, wire-arc deposition, layer-by-layer forging, aluminum alloy, titanium alloy, austenitic stainless steel, static tension test, dynamic compression test.

ABSTRACT

To select rational parameters of the process of hybrid additive manufacturing of structures made of structural metal alloys and stainless steels, mechanical characteristics capable of serving as indicators of material quality were determined. The most advanced technologies of additive manufacturing by wire-arc surfacing (plasma, plasma arc with a melting electrode, including cold metal transfer) with layer-by-layer forging with a pneumatic impact tool and subsequent heat treatment were used. Aluminum-magnesium alloy AlMg5, titanium alloy Ti-6Al-4V, austenitic stainless steels 12Cr18Ni10Ti (AISI 321) and AISI 308LSi have been studied. Samples were cut from the blanks created by additive manufacturing – blades for standard tests for static uniaxial tension and cylinders for high-speed compression tests by the Kolsky method on a Hopkinson split bar. According to the registered and processed stress–strain curves for all materials, standard strength and ductility characteristics and the Johnson – Cook law of deformation and speed hardening were determined. For a correct assessment of the mechanical properties of additively produced materials, these tests were also carried out for each of them in the form of annealed rolled products. It is established that to compare the efficiency of various technological parameters of additive manufacturing, it is advisable to use static tensile strength and uniform elongation to rupture, having the smallest statistical variation. It was also found acceptable to approximate the Johnson – Cook law of the deformation curves of each of the studied materials according to averaged data, including various technological modes. Certain mechanical characteristics seem to be necessary for the search for effective modes of hybrid additive manufacturing and numerical calculation of various elastic-plastic problems in a dynamic formulation for the studied materials for design and technological needs.

© PNRPU

Введение

Аддитивное производство проволочно-дуговой или электронно-лучевой наплавкой позволяет создавать легкие, жесткие и прочные металлические конструкции сложной формы при значительной экономии материала. Для увеличения характеристик прочности и пластичности материала вплоть до величин, характерных для катаного металла, применяются эффективные технологии проволочно-дуговой наплавки: а) плазменной (Plasma), в которой проволока подается в плазменную дугу между электродом и изделием; б) плазменно-дуговой с плавящимся электродом (Plasma-MIG), в которой дуга с плавящегося электрода горит внутри плазменной дуги с кольцевого неплавящегося анода; в) холодного переноса металла (CMT), разновидности дуговой наплавки плавящимся электродом, в которой используются импульсные ток и подача проволоки. В рамках этих технологий варьируются полярность и сила тока, траектория наплавления материала на заготовку и параметры термоцикла последующей термообработки. В качестве источника энергии также применяют электронно-лучевую пушку. Кроме того, разрабатываются технологии с проковкой каждого наплавленного слоя материала пневматическим ударным инструментом (пневмомолотком) или обкаткой его роликом. Технологии аддитивного производства проволочно-дуговой наплавкой с послойной точечной обработкой давлением или термомеханической обработкой в последние десять лет разрабатываются рядом научных организаций: университетами Крэнфилда и Манчестера [1–5], Индийским институтом технологии Бомбея [6; 7], Пермским национальным исследовательским политехническим университетом [8–12], Брянским государственным техническим университетом [13; 14], Университетом Квинсленда [15], Пекинским технологическим институтом [16], Томским политехническим университетом [17] и Институтом физики прочности и материаловедения СО РАН [18].

В настоящей работе выполнена обработка данных испытаний материалов, созданных на кафедре сварочного производства ПНИПУ с применением технологий проволочно-дуговой наплавки Plasma, Plasma-MIG и CMT с различными параметрами процесса, в том числе с послойной проковкой и последующей термообработкой. Использованы накопленные данные по алюминиево-магниевому сплаву АМг5, титановому сплаву ВТ6, аустенитным нержавеющим сталям 12Х18Н10Т и AISI 308LSi, исследованные более или менее систематиче-

ски. Данные материалы испытывались на квазистатическое одноосное растяжение согласно стандартам [19–21] и на высокоскоростное сжатие по методу Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона [22–27] при комнатной температуре. По данным испытаний определялись стандартные характеристики прочности и пластичности согласно стандартам [19–21], а также их аппроксимации законом упрочнения Джонсона – Кука [28]. Выполнен анализ полученных данных, в результате которого найдено целесообразным характеризовать качество материала и соответствующего технологического процесса двумя параметрами – статическим пределом прочности и равномерным удлинением до разрыва, имеющими наименьший статистический разброс. Также с учетом статистического разброса была найдена приемлемой аппроксимация законом Джонсона – Кука деформационных кривых каждого из исследуемых материалов по осредненным данным, включающим различные технологические режимы. Также все исследуемые характеристики и кривые определялись для эталонных материалов в виде отожженного проката, относительно которых проводилось сравнение качества материалов, выращенных аддитивным производством. Определенные характеристики прочности и пластичности представляются необходимыми для поиска эффективных режимов аддитивного производства, а законы упрочнения востребованы для численного расчета различных упругопластических задач в динамической постановке для конструкторских и технологических нужд.

Работа восполняет недостаток подобных данных в контексте аддитивного производства. Известны работы [29–36], в которых для оценки эффективности аддитивных технологий проволочно-дуговой наплавкой определялись характеристики статической прочности и пластичности, а также работы [37–40], в которых сравнивались подобные характеристики для высокоскоростных испытаний. Систематических исследований законов упрочнения и характеристик прочности и пластичности разнообразных конструкционных сплавов и сталей в широком диапазоне скоростей деформаций в литературе не обнаружено. Некоторые из представленных здесь данных испытаний уже публиковались авторами в работах [41–43].

1. Методика испытаний

Эксперимательные исследования образцов выращенных материалов на квазистатическое одноосное растяжение при комнатной температуре выполнялись на универсальной испытательной машине Instron 5882 напольного типа с максимальным усилием испытания 100 кН. Продольная деформация регистрировалась датчиком продольной деформации Instron 2620-601 с первоначальной базой $l_0 = 12,5$ мм и ходом 5 мм. Программа состояла из этапов нагружения со скоростью траверсы 1,25 мм/мин а) до деформации 5–40 % (в зависимости от испытуемого материала) с датчиком и б) последующей деформации до разрушения образца без датчика. Плоские образцы, вырезанные из выращенных заготовок в продольном направлении, имели форму лопатки и укороченную (нестандартную) длину с размерами рабочей части 20×6×3 мм (рис. 1, *a*). Образцы вырезались на промышленной электроэрозионной установке Bomatec DK7745 молибденовой проволокой 0,18 мм. Для испытаний каждого материала изготовлялось по 3–6 образцов.

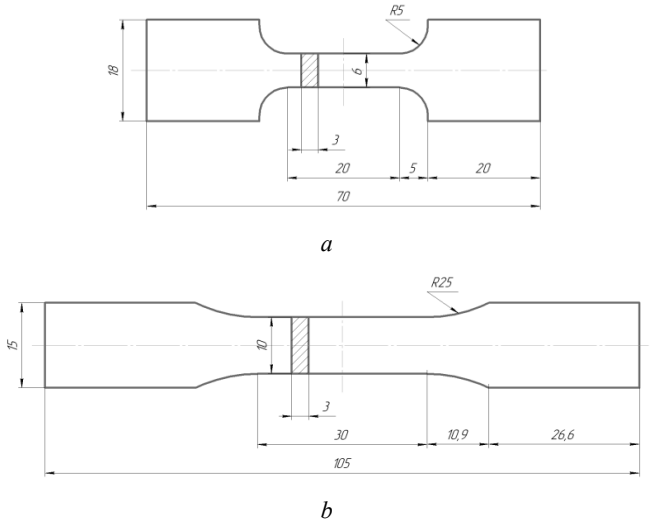


Рис.1. Размеры образцов на одноосное растяжение, изготовленные из выращенных материалов (*a*) и проката (*b*)

Fig.1. Dimensions of samples for uniaxial tension, made of grown materials (*a*) and rolled products (*b*)

Для материалов АМг5, 12Х18Н10Т и ВТ6, выращиваемых проволочно-дуговой наплавкой, изготовлялись образцы на квазистатическое одноосное растяжение и динамическое сжатие из листового проката либо поковки из соответствующего материала. Данные образцы также подвергались испытаниям, необходимым для корректности методики сравнения технологических процессов по механическим свойствам выращенных с их помощью металлов и сплавов. Заготовка подвергалась предварительной термообработке: алюминиевый сплав – отжигу в течении 3 ч при 550 °С с охлаждением на воздухе, аустенитные нержавеющие стали – отжигу в течении 2 ч при 1050 °С в атмосфере аргона с охлаждением с печью, титановый сплав – закалке в течение 1 ч при 900 °С с охлаждением на воздухе и старению в течение 3 ч при 500°С с охлаждением с печью. Плоские образцы-лопатки, вырезанные из листового проката либо поковки вдоль одного направления, имели стандартные размеры (рис. 1, *b*, [19]) и испытывались на электромеханической универсальной испытательной машине Shimadzu AG-Xplus с видеоэкстензометром. Задавалась программа с постоянной скоростью перемещения траверсы 2 мм/мин до разрушения образца. Каждое испытание проводилось для трех образцов.

Метод Кольского [22; 23] с использованием разрезного стержня Гопкинсона применяется для исследования поведения материалов в диапазоне скоростей деформации 10^2–10^4 $с^{-1}$. Схема разрезного стержня Гопкинсона [24] имеет различные модификации для проведения испытаний в условиях растяжения, сжатия, изгиба, сдвига и других напряженно-деформированных состояний [25–27]. В настоящей работе использовалась оснастка для испытаний цилиндрических образцов на сжатие, которая состоит из двух длинных стержней (нагружающего и опорного) с достаточно высоким пределом текучести и известными значениями модуля Юнга E и плотности массы ρ, по которым определяется скорость продольных упругих волн в стержне $c = \sqrt{E/\rho}$. Измерение скорости звука в рабочих стержнях производилась путем удара по свободному стержню и замера времени пробега волны сжатия по нему, определяемого по периоду повторения сигнала с тензодатчика. Для повышения точности использовалось несколько периодов.

Во время испытания цилиндрический образец помещается между нагружающим и опорным стержнями. По нагружающему стержню ударяет стержень-ударник, разгоняемый газовой пушкой до заданной скорости. Предварительная калибровка системы измерения скорости ударника (измерение базы прохода ударника между опорными точками) производится следующим образом: имитатор ударника погружается в ствол и регистрируется глубина погружения, соответствующая моментам срабатывания датчиков положения ударника. В процессе нагружения ударником импульс падающего упругого напряжения (входной импульс сжатия $\varepsilon_I(t)$) с пропорциональной скорости ударника амплитудой распространяется вдоль нагружающего стержня. Входной импульс достигает границы раздела нагружающего стержня с опорным стержнем, импульс воздействует на образец и вызывает множественные кратковременные отражения и передачи на обоих концах образца, что приводит к его высокоскоростной деформации. Регистрируются $\varepsilon_R(t)$ – импульс волны сжатия, отраженный от образца, и $\varepsilon_T(t)$ – импульс волны сжатия, прошедший через образец. Входной импульс $\varepsilon_I(t)$, отраженный импульс $\varepsilon_R(t)$ и прошедший импульс $\varepsilon_T(t)$ регистрируются тензодатчиками, расположенными на нагружающем и опорном стержнях на одинаковых расстояниях от образца. На рис. 2 (*a*) показана типичная форма импульсов. Предполагается, что деформация образца является однородной вследствие десятикратно меньшей длины образца по отношению к длине ударника, что обеспечивает большее время нарастания импульса напряжения по сравнению со временем прохождения импульса напряжения через образец. Минимальная дисперсия импульсов обеспечивается одномерным напряженным состоянием в стержнях и образце и упругим состоянием материала рабочих стержней в течение удара.

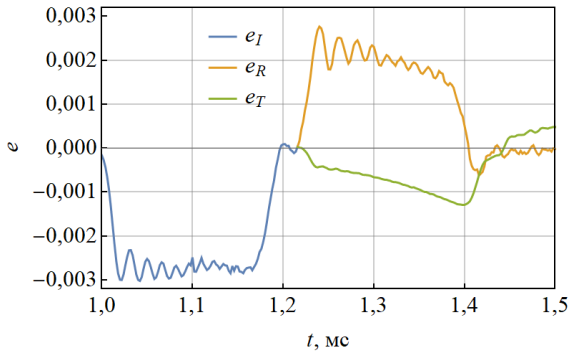
Метод Кольского [22; 23] вследствие однородности напряженно-деформированного состояния образца предполагает определение зависимостей от времени номинального напряжения, деформации и скорости деформации по тензометрированным сигналам прошедшего и отраженного импульсов по следующим соотношениям

$$n = E\frac{S}{S_0}e_T, \tag{1}$$

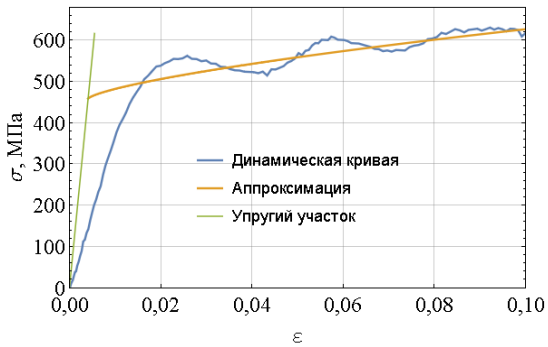
$$\dot{e} = 2\frac{c}{l_0}e_R, \tag{2}$$

$$e = \int_0^t \dot{e}dt, \tag{3}$$

где S и l – площадь поперечного сечения и длина образца в текущий момент времени, S_0 и l_0 – те же величины в начальный момент времени, $n = P/S_0$ – номинальное напряжение, $e = (l - l_0)/l_0$ – линейная деформация, E и c – модуль Юнга и скорость звука стержней.



a



b

Рис. 2. Характерный вид входного, прошедшего и отраженного импульсов, регистрируемых тензодатчиками на стержнях (*a*) и обработка динамической кривой (*b*)

Fig. 2. Characteristic type of input, transmitted and reflected pulses recorded by strain gauges on rods (*a*) and dynamic curve processing (*b*)

С учетом следующих из условия несжимаемости материала $S_0 l_0 = Sl$ выражений для текущих значений длины и площади образца $l = l_0(1+e)$, $S = S_0/(1+e)$ определялись меры истинного напряжения

$$\sigma = P / S = n(1+e) \quad (4)$$

и полной логарифмической деформации

$$\varepsilon = \ln(l / l_0) = \ln(1+e). \quad (5)$$

Определение констант закона Джонсона – Кука [28]

$$\sigma_u = \left(A + B\varepsilon_p^n\right)\left(1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \quad (6)$$

производилось по следующему алгоритму.

1. Константа A имеет смысл начального предела текучести σ_u при квазистатическом нагружении, нулевой пластической деформации и комнатной температуре. На практике выбирают значение $\sigma_{0,2}$, соответствующее условному пределу текучести σ_u при остаточной (пластической) деформации $\varepsilon_p = \varepsilon - \sigma / E$, равной $2\cdot10^{-3}$ [19].

2. При известном значении константы A квазистатическая диаграмма аппроксимируется выражением $\sigma_u = A + B\varepsilon_p^n$, соответствующим линейной аппроксимации в двойных логарифмических координатах. Пластическая компонента деформации ε_p определялась соотношением $\varepsilon_p = \varepsilon - \sigma / E$.

3. Для результатов испытаний, полученных при различных скоростях деформации при комнатной температуре, модель упрощается до $\sigma_u / \sigma_0 = 1 + C\ln\left(\dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0\right)$, где $\dot{\varepsilon}_0$ есть единица измерения скорости деформации, принятая равной 1 $с^{-1}$. Данная зависимость предела текучести аппроксимируется для значений скоростей деформации, соответствующим динамическим испытаниям $\left(\dot{\varepsilon}_p > \dot{\varepsilon}_0\right)$.

Определение условного предела текучести для динамических испытаний производилось подобным способом, однако для динамического сжатия упругий участок не выражен (рис. 2, *b*), так как увеличение напряжения связано с постепенными (пошаговыми) перемещениями нагружающего стержня вследствие волновых явлений, описанных выше. Для уточнения модели пункты 1 и 2 алгоритма выполнялись как для квазистатической, так и для динамической кривых нагружения.

Для динамических испытаний методом разрезного стержня Гопкинсона из всех испытуемых материалов, выращенных проволочно-дуговой наплавкой либо в виде отожженного листового проката, на электроэрозионной установке вырезались цилиндры диаметром 9 мм и высотой 7 или 9 мм для стали и титана соответственно, а также для АМг5 диаметром и высотой по 10 мм. Выбор размеров был обусловлен различной жесткостью образцов соответствующих материалов по отношению к жесткости нагружающих стержней. Для испытаний каждого материала изготовлялось по 8 образцов.

2. Стандартные характеристики прочности

На рис. 3–6 представлены кривые упрочнения испытанных материалов в осях полной логарифмической деформации и истинного напряжения. При этом для испытаний на одноосное растяжение эти переменные рассчитывались согласно определениям (4), (5), а для испытаний на одноосное сжатие брались с противоположным знаком.

По кривым одноосного растяжения в инженерных напряжениях и деформациях $n(e)$ определялись следующие стандартные характеристики прочности и пластичности [19]: относительное удлинение после разрыва δ, относительное равномерное удлинение δ_p, условный предел текучести с допуском $2\cdot10^{-3}$ $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление разрыву σ_B. Кроме того, определялось относительное сужение поперечного сечения после разрыва ψ. Данные характеристики всех исследуемых материалов АМг5, 12Х18Н10Т, AISI 308LSi и ВТ6 приведены в табл. 1 вместе с их доверительными интервалами с вероятностью 0,9.

Таблица 1

Стандартные характеристики прочности и пластичности

Table 1

Standard strength and ductility properties

Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B, МПа	δ_p, %	δ, %	ψ, %
АМг5					
Прокат	136 ± 18	287 ± 14	20 ± 6	22 ± 6	24 ± 5
CMT, осц. ± 45	117 ± 16	260 ± 3	20 ± 2	23 ± 3	26 ± 8
CMT, осц. ± 45, проковка	125 ± 2	266 ± 9	21 ± 5	24 ± 9	26 ± 7
CMT, осц. ± 45, тройная проковка	139 ± 10	275 ± 5	24 ± 1	30 ± 5	37 ± 3
12Х18Н10Т					
Прокат	217 ± 2	618 ± 6	53 ± 2	57 ± 2	61 ± 2
CMT, осц. 90	267 ± 16	581 ± 6	53 ± 5	58 ± 4	62 ± 15
AISI 308LSi					
Plasma-MIG, осц. 0	323 ± 18	561 ± 32	31 ± 4	45 ± 12	63 ± 9
Plasma-MIG, осц. 0, проковка	388 ± 138	597 ± 122	33 ± 22	47 ± 36	63 ± 23

Окончание табл. 1

Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B, МПа	δ_p, %	δ, %	ψ, %
ВТ6					
Поковка	849 ± 16	924 ± 17	4,6 ± 0,5	10,1 ± 0,3	19 ± 5
CMT, 170A, осц. 90, ТЦ150, проковка	886 ± 14	962 ± 14	6,3 ± 0,4	13,6 ± 1,5	23 ± 6
CMT, 170A, осц. 90, ТЦ150, проковка, ТО	836 ± 18	927 ± 10	6,5 ± 0,8	10,9 ± 3,3	16 ± 6
CMT, 170A, осц. 90, ТЦ150	864 ± 20	935 ± 13	6,2 ± 0,6	12,3 ± 2,2	18 ± 3
CMT, 170A, осц. 90, ТЦ150, ТО	853 ± 12	933 ± 12	6,6 ± 0,8	10,7 ± 1,9	16 ± 4
CMT, 170A, осц. 90, ТЦ20	814 ± 55	911 ± 27	6,9 ± 0,2	12,3 ± 1,2	19 ± 3
CMT, 170A, осц. 90, ТЦ20, ТО	844 ± 19	922 ± 12	7,3 ± 0,4	14,5 ± 0,5	18 ± 3
CMT, 120A, осц. ± 45, ТЦ150	836 ± 42	927 ± 13	5,7 ± 2,8	8,4 ± 6,1	15 ± 5
CMT, 120A, осц. ± 45, ТЦ150, ТО	867 ± 9	935 ± 9	6,4 ± 1,4	9,4 ± 1,0	17 ± 6
CMT, 215A, осц. 0, ТЦ150	826 ± 20	904 ± 12	5,0 ± 0,8	9,4 ± 2,1	19 ± 3
CMT, 215A, осц. 0, ТЦ150, ТО	805 ± 13	884 ± 11	5,8 ± 0,5	12,1 ± 2,7	25 ± 4
CMT, 140A, осц. 0, ТЦ150	917 ± 45	1000 ± 25	5,1 ± 1,0	7,8 ± 2,1	18 ± 5
CMT, 120A, осц. ± 45, ТЦ150, прямая полярность	878 ± 23	950 ± 25	6,1 ± 1,2	7,7 ± 3,6	9 ± 7

В табл. 1 использованы следующие обозначения: 120A, 170A и 215A означает силу тока, осц. ± 45 означает осцилляции траектории горелки вдоль заготовки (один слой + 45°, следующий – 45°, и т.д.), осц. 90 – наплавку с поперечными осцилляциями и осц. 0 – прямолинейную наплавку без осцилляций, ТЦ20 и ТЦ150 означает межслоевое охлаждение до 20 либо 150 °C, ТО – последующую термообработку заготовки, описанную в разделе 1.

Следует обратить внимание на существенно меньший статистический разброс значений характеристик δ_p, σ_B – координат точки максимума кривой $n(e)$, вслед за которой развивается локализация пластической деформации в виде шейки [44]. Закритическое поведение образцов при одноосном растяжении зависит от геометрических и механических несовершенств, распределенных по образцу, и поэтому значительно меньший разброс величин δ_p, σ_B, отвечающих координатам критической точки, объясним, а сами эти характеристики могут служить индикаторами свойств пластичности и прочности материала для сравнения различных технологических процессов его производства.

В данной работе не будет даваться анализ эффективности технологических процессов, требующий микроструктурного подтверждения. Отметим лишь очевидное. Среди технологических процессов аддитивного производства алюминиевого сплава АМг5 показал особенную эффективность режим с тройной проковкой, обеспечивающий выдающиеся характеристики пластичности и практически достигающие значений для листового проката характеристики прочности. Отзывчивость на послойную проковку обнаружила аустенитная нержавеющая сталь AISI 308LSi, при этом нельзя сказать, что ее механические характеристики достигают значений листового проката (материал имелся только в виде проволоки). Титановый сплав ВТ6, выращенный с однократной послойной проковкой, не показал выдающихся характеристик на фоне материалов, полученных аддитивными технологиями без проковки, но в целом целый ряд партий выращенного материала по механическим характеристикам не уступает поковке.

3. Аппроксимации кривых упрочнения

Для описания пластической деформации металлов в широком диапазоне скоростей деформации существует ряд более или менее гибких аппроксимаций [45–48]. За свою математическую простоту и гибкость большую популярность в приложениях получила четырехконстантная модель Джонсона – Кука [28], имеющая вид (6). Например, она присутствует в пакетах прикладных программ LS-DYNA [49–51], ABAQUS [52; 53], Comsol Multiphysics [54] и ЛОГОС [55], специализирующихся на описании нелинейных быстропротекающих процессов в деформируемом твердом теле.

Результаты обработки экспериментальных данных по квазистатическому растяжению и динамическому сжатию в виде кривых $\sigma(\varepsilon)$ в истинных напряжениях и полных логарифмических деформациях приведены на рис. 3–6. На рисунках показаны кривые квазистатического одноосного растяжения, осредненные по группе образцов, изготовленных по одной технологии. На этих кривых указаны среднеквадратические отклонения истинных напряжений. Динамические кривые не усреднялись. Константы кривой аппроксимации определялись по данным на отрезке деформаций ε от $2\cdot10^{-3}$ до $\ln(1+\delta_p)$, соответствующем равномерному пластическому деформированию.

Для аустенитной нержавеющей стали AISI 308LSi кривые квазистатического и высокоскоростного деформирования одновременно не могут быть описаны законом (6). При скоростях деформации порядка 10^3 с$^{-1}$ преимущественный механизм деформации этой стали двойникованием [56] описывается линейным законом деформационного упрочнения, тогда как при скоростях деформации порядка 10^{-3} с$^{-1}$ дислокационный механизм упрочнения описывается степенным законом. Для

встраивания данных по этой стали в единую аппроксимацию был предложен обобщенный закон

$$\sigma_u = A\left(1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) + B\left(1 + D\ln\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\varepsilon_p^{n+\alpha\dot{\varepsilon}_p}, \qquad (7)$$

из которого закон Джонсона – Кука (6) следует при $D = C$ и $\alpha = 0$.

Константы закона (7) для всех исследованных материалов сведены в табл. 2 (в (7) принимается $\dot{\varepsilon}_0 = 1$).

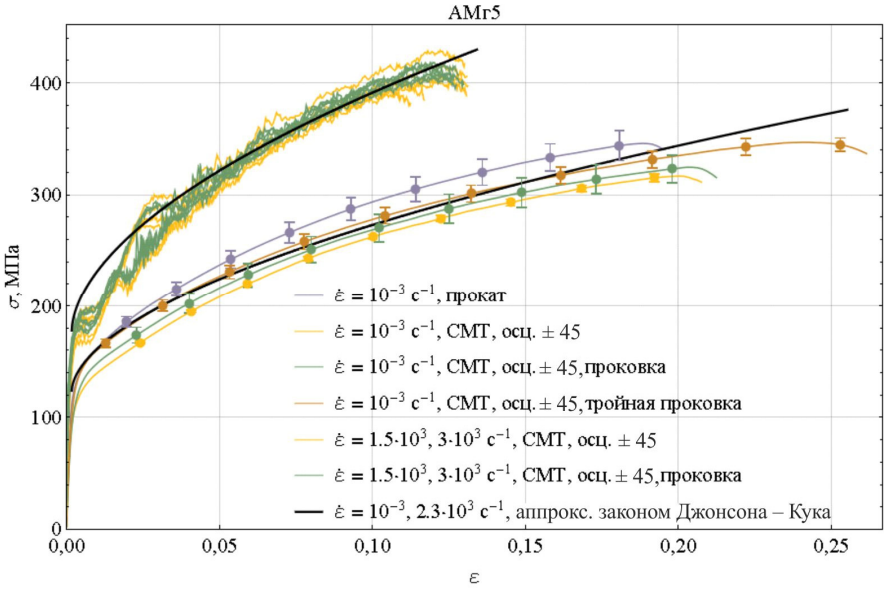


Рис. 3. Кривые деформирования сплава АМг5 в квазистатических и динамических условиях и их аппроксимация законом Джонсона – Кука

Fig. 3. Deformation curves of the AlMg5 alloy under quasi – static and dynamic conditions and their approximation by the Johnson – Cook law

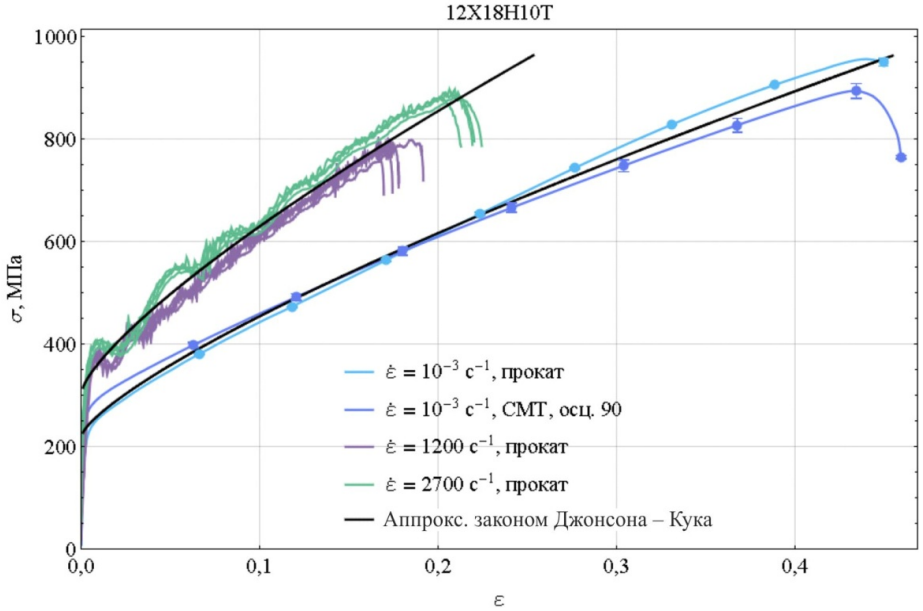


Рис. 4. Кривые деформирования сплава 12Х18Н10Т в квазистатических и динамических условиях и их аппроксимация законом Джонсона – Кука

Fig. 4. Deformation curves of the 12Cr18Ni10Ti stainless stell under quasi – static and dynamic conditions and their approximation by the Johnson – Cook law

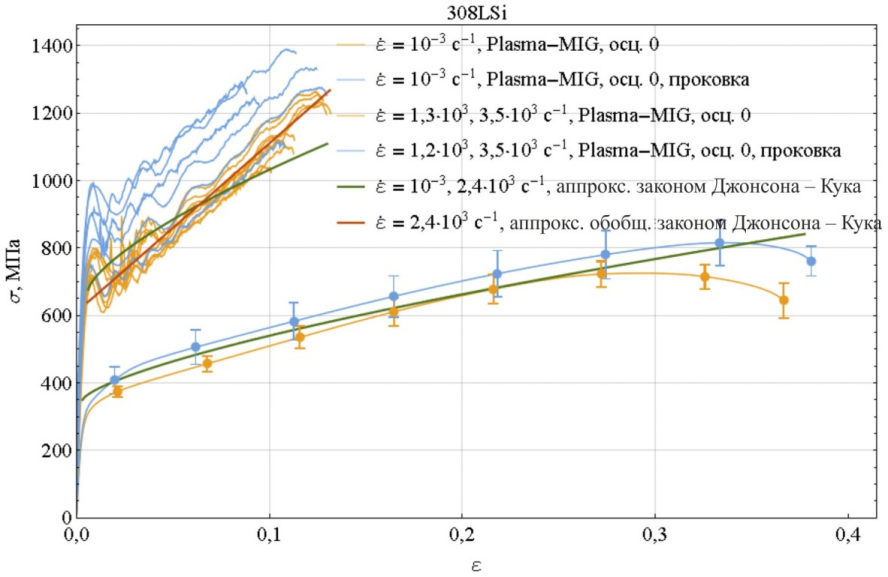


Рис. 5. Кривые деформирования сплава AISI 308LSi в квазистатических и динамических условиях и их аппроксимация законом Джонсона – Кука

Fig. 5. Deformation curves of the AISI 308LSi stainless stell under quasi – static and dynamic conditions and their approximation by the Johnson – Cook law

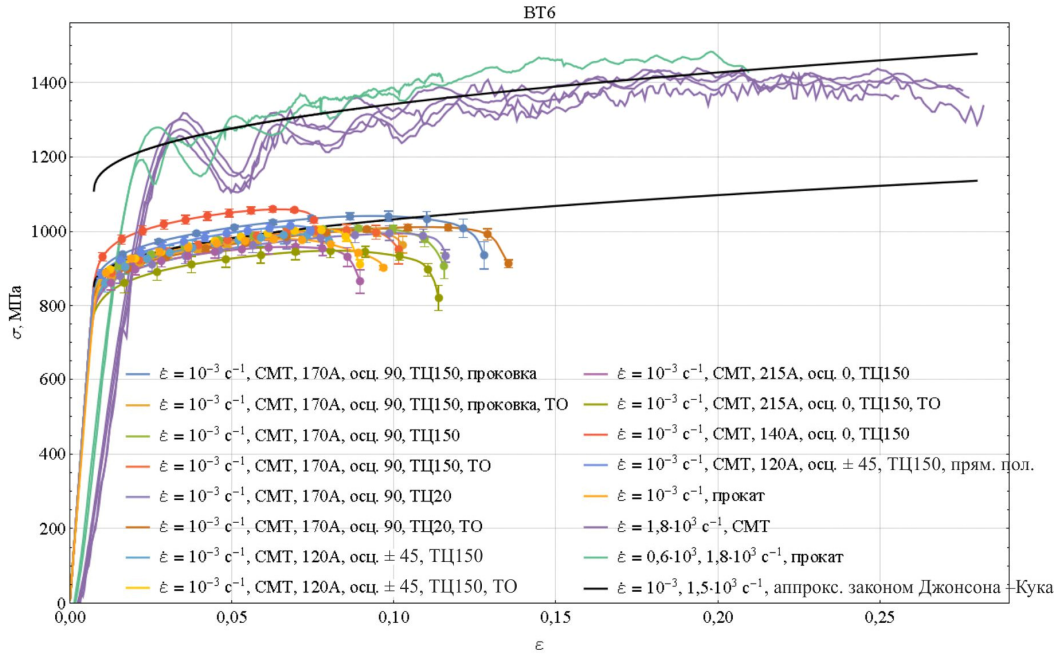


Рис. 6. Кривые деформирования сплава ВТ6 в квазистатических и динамических условиях и их аппроксимация законом Джонсона – Кука

Fig. 6. Deformation curves of the Ti-6Al-4V alloy under quasi – static and dynamic conditions and their approximation by the Johnson – Cook law

Приведенные на рис. 3–6 динамические кривые деформирования обнаруживают кучность по всей совокупности выращенных материалов и прокату/поковке, сравнимую с кучностью кривых статических испытаний, которая позволила аппроксимировать данные по каждому сплаву и стали одним законом упрочнения. Исключение, причем статистически достоверное, снова демонстрирует аустенитная нержавеющая сталь AISI 308LSi, динамическая кривая которой настолько существенно реагирует на послойную проковку выращенного материала, что соответствующие данные не были приняты во внимание при аппроксимации.

Таблица 2

Константы обобщенного закона Джонсона – Кука

Table 2

Generalised Johnson-Cook model constants

Параметр	*A*, МПа	*B*, МПа	*C*	*D*	*n*	α
АМг5	124	540	0,056	0	0,55	0
12Х18Н10Т	224	1440	0,05	0	0,8	0
AISI 308LSi	350	985	0,12	0	0,7	0
AISI 308LSi	124	540	0,106	0,56	0,7	0,039
ВТ6	853	490	0,041	0	0,42	0

Этот феномен, конечно, требует отдельного микроструктурного исследования.

Заключение

Данные по квазистатическому одноосному растяжению и динамическому сжатию сталей 12Х18Н10Т, AISI 308LSi и сплавов АМг5, ВТ6, полученных аддитивным производством проволочно-дуговой наплавкой, были обработаны с целью определения стандартных механических характеристик и аппроксимаций кривых упрочнения. Анализ достаточно большого объема данных позволил характеризовать качество наплавленного материала по двум параметрам, определяемым из испытания на одноосное растяжение, – временному сопротивлению разрыву и относительному равномерному удлинению, обнаруживающим наименьший статистический разброс. Законы деформационного упрочнения исследованных наплавленных и катаных сталей и сплавов в широком диапазоне скоростей деформаций востребованы для расчета технологических и конструкторских задач. Подобные данные с описанием методики подготовки образцов и проведения и обработки эксперимента являются редкостью в имеющейся литературе. Поведение аустенитной нержавеющей стали AISI 308LSi при высоких скоростях деформирования преподнесло некоторые сюрпризы, которые необходимо объяснить в связи с очевидным изменением механизма пластичности в этом скоростном диапазоне.

Библиографический список

1. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement / B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, J. Norrish // J. Manuf. Process. – 2018. – Vol. 35. – P. 127–139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001

2. Microstructure and Residual Stress Improvement in Wire and Arc Additively Manufactured Parts through High-Pressure Rolling / P.A. Colegrove, H.E. Coules, J. Fairman, F. Martina, T. Kashoob, H. Mamash, L.D. Cozzolino // J. Mater. Process. Technol. – 2013. – Vol. 223. – P. 1782–1791. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012

3. Deformation Microstructures and Strengthening Mechanisms for the Wire+ Arc Additively Manufactured Al-Mg4.5Mn Alloy with Inter-Layer Rolling / J. Gu, X. Wang, J. Bai, J. Ding, S.W. Williams, Y. Zhai, K. Liu // Mater. Sci. Eng. – 2018. – Vol. A722. – P. 292–301. DOI: 10.1016/j.msea.2017.11.113

4. Control of Residual Stress and Distortion in Aluminium Wire + Arc Additive Manufacture with Rolling / J.R. Honnige, P.A. Colegrove, S. Ganguly, E. Eimer, S. Kabra, S.W. Williams // Addit. Manuf. – 2018. – Vol. 22. – P. 775–783. DOI: 10.1016/j.addma.2018.06.015

5. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement / A.R. McAndrew, M.A. Rosales, P.A. Colegrove, J.R. Hönnige, A. Ho, R. Fayolle, K. Eyitayo, I. Stan, P. Sukrongpang, A. Crochemore, Z. Pinter // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 21. – P. 340–349. DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.006

6. Karunakaran K.P., Kapil S., Negi S. Multi-Station Multi-Axis Hybrid Layered Manufacturing System // Indian Patent. – 2018. – Application Number: 201821038516

7. Karunakaran K.P., Kapil S., Kulkarni P. In-situ Stress Relieving Process for Additive Manufacturing // Indian Patent. – 2016. – Application Number: 201621028306

8. Influence of surfacing technologies on structure formation of high-temperature nickel alloys / E.A. Krivonosova, Yu.D. Schitsin, D.N. Trushnikov, S.N. Myshkina, A.V. Akulova, S.D. Neulybin., A.Yu. Dushina // Metallurgist(Metallurg). – 2019. – Vol. 63, no. 1–2. – P. 197–205. DOI: 10.1007/s11015-019-00810-1

9. Use of CMT-Surfacing for Additive Formation of Titanium Alloy Workpieces / Y.D. Shchitsyn, E.A. Krivonosova, D.N. Trushnikov, T.V. Olshanskaya, M.F. Kartashov, M.F. Kartashov, S.D. Neulybin // Metallurgist (Metallurg). – 2020. – Vol. 64, no. 1–2. – P. 67–74. DOI: 10.1007/s11015-020-00967-0

10. Structure and properties of aluminium magnesium scandium alloy resultant from the application of plasma welding with by-layer deformation hardening / Y.D. Shchitsyn, E.A. Krivonosova, T.V. Olshanskaya, S.D. Neulybin // Tsvetnye Metally [Electronic resource]. – 2020. – No. 2. – P. 89–94. DOI 10.17580/tsm.2020.02.12.

11. Formation of Structure and Properties of Two-Phase Ti-6Al-4V Alloy during Cold Metal Transfer Additive Deposition with Interpass Forging / Y. Shchitsyn, M. Kartashev, E. Krivonosova, T. Olshanskaya, D. Trushnikov // Materials. – 2021. – Vol. 14, no. 16. – Art. 4415. – 18 p. DOI 10.3390/ma14164415.

12. Improving VT6 Titanium-Alloy Components Produced by Multilayer Surfacing / D.N. Trushnikov, M.F. Kartashev, T.V. Olshanskaya, M.R. Mindibaev, Y.D. Shchitsyn, F.R. Saucedo-Zendejo // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41, no. 9. – P. 848850. DOI: 10.3103/S1068798X21090264

13. Возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.А. Жирков, О.Н. Федонин, С.О. Федонина, А.В. Хандожко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 4 (52). – С. 151–160. DOI: 10.12737/23204

14. Федонина С.О. Повышение качества синтезированных из проволоки деталей волновым термодеформационным упрочнением: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.02.08 – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2021. – 186 с.

15. Controlling the microstructure and properties of wire arc additive manufactured Ti–6Al–4V with trace boron additions / M.J. Bermingham, D. Kent, H. Zhan, D.H. StJohn, M.S. Dargusch // Acta Materialia. – 2015. – Vol. 91. – P. 289–303. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.03.035

16. Reducing arc heat input and obtaining equiaxed grains by hot-wire method during arc additive manufacturing titanium

alloy / Z. Li, C. Liu, T. Xu, L. Ji, D. Wang, J. Lu, S. Ma, H. Fan // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 742. – P. 287–294. DOI: 10.1016/j.msea.2018.11.022

17. Development of electron-beam equipment and technology for additive layer-wise wire cladding / V.V. Fedorov, V.A. Klimenov, A.V. Batranin, P. Ranga // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Vol. 2167, no. 1. – P. 020097. DOI: 10.1063/1.5131964

18. Structure and Phase Composition of Ti–6Al–4V Alloy Obtained by Electron-Beam Additive Manufacturing / V.R. Utyaganova, A.V. Vorontsov, A.A. Eliseev, K.S. Osipovich, K.N. Kalashnikov, N.L. Savchenko, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, no. 8. – P. 1461–1468. DOI: 10.1007/s11182-019-01864-z

19. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2008. – 24 с.

20. ASTM E6-09. Standard Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing. – ASTM International, 2010. – 10 p.

21. ASTM E8-04. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. – ASTM International, 2010. – 24 p.

22. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading // Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1949. – Vol. 62, no. 11. – P. 676–700. DOI: 10.1088/0370-1301/62/11/302

23. Kolsky H. Stress waves in solids // Journal of sound and Vibration. – 1964. – Vol. 1, no. 1. – P. 88–110. DOI: 10.1016/0022-460X(64)90008-2

24. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain // Experimental Mechanics. – 1981. – Vol. 21, no. 5. – P. 177–185. DOI: 10.1007/BF02326644

25. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method // International Journal of Impact Engineering. – 1995. – Vol. 16, no. 2. – P. 321–330. DOI: 10.1016/0734-743X(95)93939-G

26. Effects of high strain rate and self-heating on plastic deformation of metal materials under fast compression loading / A. Bragov, L. Igumnov, A. Konstantinov, A. Lomunov, E. Rusin // Journal of Dynamic Behavior of Materials. – 2019. – Vol. 5, no. 3. – P. 309–319. DOI: 10.1007/s40870-019-00214-x

27. Экспериментальное исследование локализации пластической деформации в сплаве АМг5 при различных видах динамического воздействия / М.А. Соковиков, В.А. Оборин, В.В. Чудинов, С.В. Уваров, О.Б. Наймарк // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2021. – № 3. – С. 154–162. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.14

28. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands. 19–21 April 1983. – Vol. 21. – P. 541–547.

29. Forming process, microstructure, and mechanical properties of thin-walled 316L stainless steel using speed-cold-welding additive manufacturing / W. Wu, J. Xue, L. Wang, Z. Zhang, Y. Hu, C. Dong // Metals. – 2019. – Vol. 9, no. 1. – P. 109. DOI: 10.3390/met9010109

30. Microstructure and compressive behavior of Ti-6Al-4V alloy built by electron beam free-form fabrication / V.A. Klimenov, V.V. Fedorov, M.S. Slobodyan, N.S. Pushilina, I.L. Strelkova, A.A. Klopotov, A.V. Batranin // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – Vol. 29, no. 11. – P. 7710–7721. DOI: 10.1007/s11665-020-05223-9

31. Anisotropy of the tensile properties in austenitic stainless steel obtained by wire-feed electron beam additive growth / E.V. Melnikov, E.G. Astafurova, S.V. Astafurov, G.G. Maier, V.A. Moskvina, M.Y. Panchenko, S.V. Fortuna, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev // Letters on Materials. – 2019. – Vol. 9, no. 4. – P. 460–464. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-4-460-464

32. Advanced high-strength AA5083 welds by high-speed hybrid laser-arc welding / A. Vorontsov, A. Zykova, A. Chumaevskii, K. Osipovich, V. Rubtsov, E. Astafurova, E. Kolubaev // Materials Letters. – 2021. – Vol. 291. – P. 129594. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.129594

33. The microstructure, phase composition and tensile properties of austenitic stainless steel in a wire-feed electron beam melting combined with ultrasonic vibration / A. Vorontsov, S. Astafurov, E. Melnikov, V. Moskvina, E. Kolubaev, E. Astafurova // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Vol. 820. – P. 141519. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141519

34. Микроструктура и механические свойства малоуглеродистой стали, полученной методом электронно-лучевого аддитивного производства / Е.Г. Астафурова, Е.В. Мельников, С.В. Астафуров, М.Ю. Панченко, К.А. Реунова, В.А. Москвина, Г.Г. Майер, Е.А. Колубаев // Письма о материалах. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 427–432. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-427-432

35. Electron-beam additive manufacturing of high-nitrogen steel: Microstructure and tensile properties / S. Astafurov, E. Astafurova, K. Reunova, E. Melnikov, M. Panchenko, V. Moskvina, G. Maier, V. Ruttsov, E. Kolubaev // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Vol. 826. – P. 141951. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141951

36. Microstructure and mechanical properties of Nb-alloyed austenitic CrNi steel fabricated by wire-feed electron beam additive manufacturing / M.Y. Panchenko, G.G. Maier, V.A. Moskvina, S.V. Astafurov, E.V. Melnikov, K.A. Reunova, E.A. Kolubaev, E.G. Astafurova // Materials Characterization. – 2022. – Vol. 190. – P. 112063. DOI: 10.1016/j.matchar.2022.112063

37. Fadida R., Rittel D., Shirizly A. Dynamic mechanical behavior of additively manufactured Ti6Al4V with controlled voids // Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME. – 2015. – Vol. 82, no. 4. – P. 041004. DOI: 10.1115/1.4029745

38. Dorogoy A., Rittel D. Dynamic large strain characterization of tantalum using shear-compression and shear-tension testing // Mechanics of Materials. – 2017. – Vol. 112. – P. 143–153. DOI: 10.1016/j.mechmat.2017.06.003

39. Fadida R., Shirizly A., Rittel D. The static and dynamic shear-tension mechanical response of AM Ti6Al4V containing spherical and prolate voids // International Journal of Engineering Science. – 2019. – Vol. 141. – P. 1–15. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2019.05.003

40. Goviazin G.G., Shirizly A., Rittel D. Static and dynamic mechanical properties of wire and arc additively manufactured SS316L and ER70S6 // Mechanics of Materials. – 2022. – Vol. 164. – P. 104108. DOI: 10.1016/j.mechmat.2021.104108

41. Искажение формы, локализация пластической деформации и распределение остаточных напряжений при односторонней проковке/обкатке бруса. Применение результатов к аддитивному производству шпангоута с послойной обработкой давлением / И.Э. Келлер, А.В. Казанцев, Д.С. Дудин, Г.Л. Пермяков, М.Ф. Карташев // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 434–443. DOI 10.7242/1999-6691/2021.14.4.36

42. Моделирование распределения остаточной пористости металлического изделия при аддитивном производстве с послойной проковкой / И.Э. Келлер, А.В. Казанцев, Д.С. Дудин, Г.Л. Пермяков, Д.Н. Трушников // Проблемы прочности и пластичности. – 2022. – Т. 84, № 2. – С. 247–258. DOI 10.32326/1814-9146-2022-84-2-247-258

43. Моделирование рекристаллизации сплава АМг5 в прокованном слое при наплавке материала в процессе гибридного аддитивного производства / Н.К. Салихова, Д.С. Дудин, И.Э. Келлер, А.А. Осколков, А.В. Казанцев, Д.Н. Трушников // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 234–246. DOI 10.7242/1999-6691/2022.15.2.18

44. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Мир, 1969. – Т. 2. – 863 с.

45. Cowper G.R., Symonds P.S. Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams. Division of Applied Mathematics, Brown University, 1957. – 46 p. DOI: 10.21236/ad0144762

46. Bodner S., Partom Y. Constitutive equations for elastic-viscoplastic strain-hardening materials // Journal of Applied Mechanics. – 1975. – Vol. 42, no. 2. – P. 385–389. DOI: 10.1115/1.3423586

47. Zerilli F.J., Armstrong R.W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations // Journal of Applied Physics. – 1987. – Vol. 61, no. 5. – P. 1816–1825. DOI: 10.1063/1.338024

48. Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate // Journal of applied physics. – 1980. – Vol. 51, no. 3. – P. 1498–1504. DOI: 10.1063/1.327799

49. LS-DYNA® Keyword user's manual. Volume II. Material models. Ver. R13. LSTC, 2021. 1993 p. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.dynamore.de/en/downloads/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_ii_r13.pdf (дата обращения: 20.10.2022).

50. Кузькин В.А., Михалюк Д.С. Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона – Кука при высокоскоростном деформировании алюминия // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 1. – С. 32–43. DOI: 10.7242/1999-6691/2010.3.1.4

51. Бузюркин А.Е., Гладкий И.Л., Краус Е.И. Определение параметров модели Джонсона-Кука для описания процессов деформирования и разрушения титановых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. – 2015. – Т. 56, № 2. – С. 188–195. DOI: 10.15372/PMTF20150219

52. Abaqus. Инженерные программы. ТЕСИС [Электронный ресурс]. – URL: https://tesis.com.ru/cae_brands/abaqus (дата обращения: 20.10.2022).

53. Шалимов А.С. Ташкинов М.А. Моделирование деформирования и разрушения пористых сред с учетом особенностей их морфологического строения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – №. 4. – С. 175–187. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.15

54. Ключевые обновления COMSOL Multiphysics® 5.5. Модель Джонсона – Кука для пластичности, зависящей от скорости деформации [Электронный ресурс]. – URL: https://www.comsol.ru/release/5.5/nonlinear-structural-materials-module (дата обращения: 20.10.2022).

55. ЛОГОС Прочность. Модели материального деформирования для динамического анализа [Электронный ресурс]. – URL: http://logos.vniief.ru/products/strength (дата обращения: 20.10.2022).

56. Pham M.S., Dovgyy B., Hooper P.A. Twinning induced plasticity in austenitic stainless steel 316L made by additive manufacturing // Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. A704. – P. 102–111. DOI: 10.1016/j.msea.2017.07.082

References

1. Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., Xu J., Norrish J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement // J. Manuf. Process. – 2018. – Vol. 35. – P. 127–139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001

2. Colegrove P.A., Coules H.E., Fairman J., Martina F., Kashoob T., Mamash H., Cozzolino L.D. Microstructure and Residual Stress Improvement in Wire and Arc Additively Manufactured Parts through High-Pressure Rolling // J. Mater. Process. Technol. – 2013. Vol. 223. – P. 1782-1791. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012

3. Gu J., Wang X., Bai J., Ding J., Williams S.W., Zhai Y., Liu K. Deformation Microstructures and Strengthening Mechanisms for the Wire+ Arc Additively Manufactured Al-Mg4.5Mn Alloy with Inter-Layer Rolling // Mater. Sci. Eng. – 2018. –Vol. A722. – P. 292-301. DOI: 10.1016/j.msea.2017.11.113

4. Honnige J.R., Colegrove P.A., Ganguly S., Eimer E., Kabra S., Williams S.W. Control of Residual Stress and Distortion in Aluminium Wire + Arc Additive Manufacture with Rolling // Addit. Manuf. – 2018. – Vol. 22. – P. 775–783. DOI: 10.1016/j.addma.2018.06.015

5. McAndrew A.R., Rosales M.A., Colegrove P.A., Hönnige J.R., Ho A., Fayolle R., Eyitayo K., Stan I., Sukrongpang P., Crochemore A., Pinter Z. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 21. – P. 340–349. DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.006

6. Karunakaran K.P., Kapil S., Negi S. Multi-Station Multi-Axis Hybrid Layered Manufacturing System / Indian Patent. – 2018. – Application Number: 201821038516

7. Karunakaran K.P., Kapil S., Kulkarni P. In-situ Stress Relieving Process for Additive Manufacturing / Indian Patent. – 2016. – Application Number: 201621028306

8. E. A. Krivonosova , Yu D Schitsin,D. N. Trushnikov, S.N. Myshkina, A.V. Akulova, S.D. Neulybin., A Yu Dushina / Influence of surfacing technologies on structure formation of high-temperature nickel alloys// Metallurgist(Metallurg). – 2019. – Vol. 63, No. 1–2. – P. 197–205. DOI: 10.1007/s11015-019-00810-1

9. Use of CMT-Surfacing for Additive Formation of Titanium Alloy Workpieces / Y.D. Shchitsyn, E.A. Krivonosova, D.N. Trushnikov, T.V. Olshanskaya, M.F. Kartashov, M.F. Kartashov, S.D. Neulybin // Metallurgist (Metallurg). – 2020. – Vol. 64, No. 1-2. – P. 67–74. DOI: 10.1007/s11015-020-00967-0

10. Structure and properties of aluminium magnesium scandium alloy resultant from the application of plasma welding with by-layer deformation hardening / Y.D. Shchitsyn, E.A. Krivonosova, T.V. Olshanskaya, S.D. Neulybin // Tsvetnye Metally [Electronic resource]. – 2020. – No. 2. – P. 89–94. DOI 10.17580/tsm.2020.02.12.

11. Formation of Structure and Properties of Two-Phase Ti-6Al-4V Alloy during Cold Metal Transfer Additive Deposition with Interpass Forging / Y. Shchitsyn, M. Kartashev, E. Krivonosova, T. Olshanskaya, D. Trushnikov // Materials. – 2021. – Vol. 14, No. 16. – Art. 4415. – 18 p. DOI 10.3390/ma14164415.

12. Improving VT6 Titanium-Alloy Components Produced by Multilayer Surfacing / D.N. Trushnikov, M.F. Kartashev, T.V. Olshanskaya, M.R. Mindibaev, Y.D. Shchitsyn, F.R. Saucedo-Zendejo // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41, No. 9. – P. 848850. DOI: 10.3103/S1068798X21090264

13. Kirichek A.V., Solovyov D.L., Zhirkov A.A., Fedonin O.N., Fedonina S.O., Khandozhko A.V. Potentialities in additive-subtractive-strengthening techniques // Bulletin of Bryansk State Technical University. 2016. No. 4 (52). P. 151-160. DOI: 10.12737/23204

14. Fedonina S.O. Improving the quality of parts synthesized from wire by wave thermal deformation hardening / Thesis of phys.-math. candidate degree. Bryansk State Technical University, 2021. 186 p. [In Russian]

15. Bermingham M.J., Kent D., Zhan H., StJohn D.H., Dargusch M.S. Controlling the microstructure and properties of wire arc additive manufactured Ti–6Al–4V with trace boron additions //Acta Materialia. – 2015. – Vol. 91. – P. 289-303. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.03.035

16. Li Z., Liu C., Xu T., Ji L., Wang D., Lu J., Ma S., Fan H. Reducing arc heat input and obtaining equiaxed grains by hot-wire method during arc additive manufacturing titanium alloy // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 742. – P. 287-294. DOI: 10.1016/j.msea.2018.11.022

17. Fedorov V.V., Klimenov V.A., Batranin A.V., Ranga P. Development of electron-beam equipment and technology for additive layer-wise wire cladding //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Vol. 2167. – №. 1. – P. 020097. DOI: 10.1063/1.5131964

18. Utyaganova V.R., Vorontsov A.V., Eliseev A.A., Osipovich K.S., Kalashnikov K.N., Savchenko N.L., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Structure and Phase Composition of Ti–6Al–4V Alloy Obtained by Electron-Beam Additive Manufacturing //Russian Physics Journal. – 2019. – Т. 62. – №. 8. – С. 1461-1468. DOI: 10.1007/s11182-019-01864-z

19. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2008. – 24 с.

20. ASTM E6-09. Standard Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing. – ASTM International, 2010. – 10 p.

21. ASTM E8-04. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. – ASTM International, 2010. – 24 p.

22. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading // Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1949. – Vol. 62. – No. 11. – P. 676-700. DOI: 10.1088/0370-1301/62/11/302

23. Kolsky H. Stress waves in solids // Journal of sound and Vibration. – 1964. – Vol. 1. – №. 1. – P. 88-110. DOI: 10.1016/0022-460X(64)90008-2

24. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain // Experimental Mechanics. – 1981. – Vol. 21, No. 5. P. 177-185. DOI: 10.1007/BF02326644

25. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method // International Journal of Impact Engineering. – 1995. – Vol. 16, No. 2. – P. 321-330. DOI: 10.1016/0734-743X(95)93939-G

26. Bragov A., Igumnov L., Konstantinov A., Lomunov A., Rusin E. Effects of high strain rate and self-heating on plastic deformation of metal materials under fast compression loading // Journal of Dynamic Behavior of Materials. – 2019. – Vol. 5, No. 3. – P. 309-319. DOI: 10.1007/s40870-019-00214-x

27. Sokovikov M.A., Oborin V.A., Chudinov V.V., Uvarov S.V., Naimark O.B. The Experimental Study of Plastic Strain Localization in the AMg6 Alloy under Various Types of Dynamic Loads. PNRPU Mechanics Bulletin, 2021, no. 3, pp. 154-162. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.14

28. Johnson G. R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands. 19–21 April 1983. – Vol. 21. – P. 541–547.

29. Wu W., Xue J., Wang L., Zhang Z., Hu Y., Dong C. Forming process, microstructure, and mechanical properties of thin-walled 316L stainless steel using speed-cold-welding additive manufacturing // Metals. – 2019. – Vol. 9. – №. 1. – P. 109. DOI: 10.3390/met9010109

30. Klimenov, V.A., Fedorov V.V., Slobodyan M.S., Pushilina N.S., Strelkova I.L., Klopotov A.A., Batranin A.V. Microstructure and compressive behavior of Ti-6Al-4V alloy built by electron beam free-form fabrication //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – Vol. 29. – №. 11. – P. 7710-7721. DOI: 10.1007/s11665-020-05223-9

31. Melnikov E.V., Astafurova E.G., Astafurov S.V., Maier G.G., Moskvina V.A., Panchenko M.Y., Fortuna S.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Anisotropy of the tensile properties in austenitic stainless steel obtained by wire-feed electron beam additive growth // Letters on Materials. – 2019. – Vol. 9. – №. 4. – P. 460-464. DOI: 10.22226/2410-3535-2019-4-460-464

32. Vorontsov A., Zykova A., Chumaevskii A., Osipovich K., Rubtsov V., Astafurova E., Kolubaev E. Advanced high-strength AA5083 welds by high-speed hybrid laser-arc welding // Materials Letters. – 2021. – Vol. 291. – P. 129594. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.129594

33. Vorontsov A., Astafurov S., Melnikov E., Moskvina V., Kolubaev E., Astafurova E. The microstructure, phase composition and tensile properties of austenitic stainless steel in a wire-feed electron beam melting combined with ultrasonic vibration // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Vol. 820. – P. 141519. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141519

34. Astafurova E.G., Melnikov E.V., Astafurov S.V., Panchenko M.Y., Reunova K.A., Moskvina V.A., Maier G.G., Kolubaev E.A. Microstructure and mechanical properties of low-carbon steel fabricated by electron-beam additive manufacturing. Lett. Mater., 2021, 11(4) 427-432. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-427-432

35. Astafurov S., Astafurova E., Reunova K., Melnikov E., Panchenko M., Moskvina, V., Maier G., Ruttsov V., Kolubaev E. Electron-beam additive manufacturing of high-nitrogen steel: Microstructure and tensile properties // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Vol. 826. – P. 141951. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141951

36. Panchenko M.Y., Maier G.G., Moskvina V.A., Astafurov S.V., Melnikov E.V., Reunova K.A., Kolubaev E.A., Astafurova E.G. Microstructure and mechanical properties of Nb-alloyed austenitic CrNi steel fabricated by wire-feed electron beam additive manufacturing // Materials Characterization. – 2022. – Vol. 190. – P. 112063. DOI: 10.1016/j.matchar.2022.112063

37. Fadida R., Rittel D., Shirizly A. Dynamic mechanical behavior of additively manufactured Ti6Al4V with controlled voids // Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME. – 2015. – Vol. 82. – №. 4. – P. 041004. DOI: 10.1115/1.4029745

38. Dorogoy A., Rittel D. Dynamic large strain characterization of tantalum using shear-compression and shear-tension testing // Mechanics of Materials. – 2017. – Vol. 112. – P. 143–153. DOI: 10.1016/j.mechmat.2017.06.003

39. Fadida R., Shirizly A., Rittel D. The static and dynamic shear-tension mechanical response of AM Ti6Al4V containing spherical and prolate voids // International Journal of Engineering Science. – 2019. – Vol. 141. – P. 1–15. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2019.05.003

40. Goviazin G. G., Shirizly A., Rittel D. Static and dynamic mechanical properties of wire and arc additively manufactured

SS316L and ER70S6 // Mechanics of Materials. – 2022. – Vol. 164. – P. 104108. DOI: 10.1016/j.mechmat.2021.104108

41. Keller I.E., Kazantsev A.V., Dudin D.S., Permyakov G.L., Kartashev M.F. Shape distortions, plastic strains and residual stresses after one-sided forging/rolling of the beam: application to additive manufacturing of the linear metal segment with layer-by-layer pressure treatment // Computational Continuum Mechanics. – 2021. – Vol. 14, No. 4. – P. 434-443. DOI 10.7242/1999-6691/2021.14.4.36

42. Keller I.E., Kazantsev A.V., Dudin D.S., Permyakov G.L.1, Trushnikov D.N. Modeling of the distribution of residual porosity of a metal product in additive manufacturing with layer-by-layer forging // Problems of Strength and Plasticity. – 2022. – Vol. 84, No. 2. – P. 247-258. DOI 10.32326/1814-9146-2022-84-2-247-258 [In Russian]

43. Salikhova N.K., Dudin D.S., Keller I.E., Oskolkov A.A., Kazantsev A.V., Trushnikov D.N. Modeling of AMg6 alloy recrystallization in the forged layer during the overlay welding of a material in the process of hybrid additive manufacturing // Computational Continuum Mechanics. – 2022. – Vol. 15, No. 2. – P. 234–246. DOI 10.7242/1999-6691/2022.15.2.18

44. Nadai A. Theory of flow and fracture of solids. Vol 2. Pittsburgh: McGrow Hill, 1963.

45. Cowper G.R., Symonds P.S. Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams. Division of Applied Mathematics, Brown University, 1957. – 46 p. DOI: 10.21236/ad0144762

46. Bodner S., Partom Y. Constitutive equations for elastic-viscoplastic strain-hardening materials // Journal of Applied Mechanics. – 1975. – Vol. 42, № 2. – P. 385-389. DOI: 10.1115/1.3423586

47. Zerilli F.J., Armstrong R.W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations // Journal of Applied Physics. – 1987. – Vol. 61, № 5. – P. 1816–1825. DOI: 10.1063/1.338024

48. Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate // Journal of applied physics. – 1980. – Vol. 51, №. 3. – C. 1498-1504. DOI: 10.1063/1.327799

49. LS-DYNA® Keyword user's manual. Volume II. Material models. Ver. R13. LSTC, 2021. 1993 p. URL: https://www.dynamore.de/en/downloads/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_ii_r13.pdf (20 October 2022)

50. Kuzkin V.A., Mihaluk D.S. Application of numerical simulation for identification of Johnson-Cook material model parameters for aluminum under high-speed loading // Computational Continuum Mechanics. – 2010. – Vol. 3, No. 1. – P. 32–43. DOI: 10.7242/1999-6691/2010.3.1.4 [In Russian]

51. Buzyurkin A.E., Gladky I.L., Kraus E.I. Determination of parameters of the Johnson-Cook model for the description of deformation and fracture of titanium alloys // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2015. – Vol. 56. – P. 330-336. DOI: 10.1134/S0021894415020194

52. Abaqus. Inzhenernye programmy. TESIS. [Abaqus. Engineering programs. TESIS.] URL: https://tesis.com.ru/cae_brands/abaqus. (20 October 2022)

53. Shalimov A.S., Tashkinov M.A. Modeling of deformation and fracture of porous heterogeneous media taking into account their morphological composition. PNRPU Mechanics Bulletin, 2020, no. 4, pp. 175-187. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.15

54. Klyuchevye obnovleniya COMSOL Multiphysics® 5.5. Model' Dzhonsona – Kuka dlya plastichnosti, zavisyashchej ot skorosti deformacii. [COMSOL Multiphysics® 5.5 Key Updates. Johnson-Cook Model for Strain Rate-Dependent Plasticity.] URL: https://www.comsol.ru/release/5.5/nonlinear-structural-materials-module (20 October 2022)

55. LOGOS Prochnost'. Modeli material'nogo deformirovaniya dlya dinamicheskogo analiza. [LOGOS Strength. Material deformation models for dynamic analysis.] URL: http://logos.vniief.ru/products/strength (20 October 2022)

56. Pham M.S., Dovgyy B., Hooper P.A. Twinning induced plasticity in austenitic stainless steel 316L made by additive manufacturing // Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. A704. – P. 102–111. DOI: 10.1016/j.msea.2017.07.082

Благодарность. Авторы выражают благодарность М.В. Банникову (ИМСС УрО РАН), А.М. Панькову и М.Н. Муллахметову (ПНИПУ) за участие в испытаниях материалов, а также М.Ф. Карташеву, С.Д. Неулыбину и И.П. Овчинникову (ПНИПУ) за аддитивное производство заготовок.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-19-00715).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Acknowledgement. The authors are grateful to M.V. Bannikov (IMSS UB RAS), A.M. Pankov and M.N. Mullakhmetov (PNRPU) for participation in the testing of materials, as well as M.F. Kartashev, S.D. Neulybin and I.P. Ovchinnikov (PNRPU) for additive manufacturing of blanks.

Financing. This work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 21-19-00715).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.