АПРОБАЦИЯ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА КРУЧЕНИЕ

А. А. БОГАТОВ¹, *д-р техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением;*
Д. Л. ШВАРЦ¹, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой обработки металлов давлением;
С. Н. ЛЕЖНЕВ², канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры “Металлургия и горное дело”;
А. О. ТОЛКУШКИН¹, аспирант кафедры обработки металлов давлением, a.o.tolkushkin@urfu.ru
(¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия,
г. Екатеринбург; ² Рудненский индустриальный институт, Казахстан, г. Рудный)

Аннотация. Важную роль в процессе контроля качества металлопродукции играет оборудование для определения механических и эксплуатационных характеристик исследуемых материалов. Одним из методов определения механических характеристик материалов является способ испытания цилиндрических образцов на кручение. Имеющееся в настоящее время на рынке России и Казахстана оборудование для проведения испытаний на кручение в большинстве случаев произведено за пределами стран, входящих в состав ЕврАзЭС. В связи с этим актуальной является задача разработки и конструирования отечественных аналогов испытательного оборудования на кручение. Представлены описание и технические характеристики стенда для механического испытания материалов на кручение, сопротивление деформации и пластичности, для исследования процессов упрочнения и разупрочнения, разработанного на кафедре обработки металлов давлением Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. Показаны результаты опробования нового оборудования для испытания цилиндрических образцов на однонаправленное и знакопеременное кручение. Для проведения эксперимента было изготовлено девять образцов предварительно отобранного на основе моделирования вида, которые испытывали при различных схемах деформации: три образца — при однонаправленном кручении со скоростью закручивания активного захвата 1, 5 и 10 об/м; три пары образцов — при знакопеременном кручении при двух амплитудах 30 и 60 град. с аналогичными скоростями закручивания активного захвата. В результате испытаний для каждого образца были построены графики крутящего момента, которые показали, что наибольшее влияние на количество циклов деформации до разрушения образца оказывает амплитуда при знакопеременной деформации: чем она ниже, тем большее количество циклов может выдержать образец до разрушения. По результатам проведенной работы была доказана возможность использования стенда для проведения механических испытаний материалов.

Ключевые слова: контроль качества металлопродукции, стенд для механического испытания, однонаправленное и знакопеременное кручение, цилиндрические образцы.

Ссылка для цитирования: Богатов А.А., Шварц Д.Л., Лежнев С.Н., Толкушкин А.О. Аprobация нового оборудования для механического испытания материалов на кручение // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 4. С. 382-390

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-4-382-390

TRIAL OF NEW EQUIPMENT FOR MATERIALS TORSION MECHANICAL TEST

A. A. BOGATOV¹, *HD (Tech.), Prof., Dpt. of metals forming; D. L. SHVARTS¹, HD (Tech.), Prof. Ass.,*
Head of Dpt. of metals forming; S. N. LEZHNEV², PhD (Tech.), Prof., Dpt. “Metallurgy and Mining”;
A. O. TOLKUSHUN¹, postgraduate, Dpt. of metals forming, a.o.tolkushkin@urfu.ru
(¹ Ural Federal University after the First President of Russia B.N. El'tsin,
Russia, Ekaterinburg; ² Rudny Industrial Institute, Kazakhstan, Rudny)

Abstract. The equipment for measuring mechanical and operational characteristics of materials play an important role in the process of metal products quality control. One of the methods of determining of material mechanical characteristics is the method of cylindrical samples torsion tests. The equipment available at present at Russia and Kazakhstan markets for torsion tests is manufactured mainly outside the EvrAzES countries. Therefore, elaboration and designing of domestic analogs of equipment for torsion tests is an actual task. Description and technical characteristics of the testing bench presented, developed at the Department of metals forming of the Ural Federal University after the first President of Russia B.N. El'tsin. The main features of the bench are materials mechanical torsion testing, plasticity and resistance against deformation measuring, study of hardening and softening processes. Results of new equipment trials for cylinder samples tests for unidirectional and alternating torsion presented. For the experiment 9, samples were manufactured, preliminary selected based on the computer simulation of the sample type. The samples were tested at various deformation schemes: three samples – at unidirectional torsion with torsion speed of active grip 1, 5 and 10 r/min, three pairs of samples – at alternating torsion, two amplitudes being 30 and 60 degrees and analog speed of active grip torsion. As a result of the tests, graphs of the torque were built for every sample, which showed, that amplitude at the alternative load has the biggest effect on the number of deformation cycles before a sample destruction: the smaller the amplitude is, the bigger number of cycles the sample

can withstand before destruction. Based on the results of work carried out, the possibility of the bench usage for materials testing was proved.

Key words: metal products quality control, bench for mechanical test, unidirectional and alternating torsion, cylindrical samples.

For citation: Bogatov A.A., Shvarts D.L., Lezhnev S.N., Tolkushin A.O. Trial of new equipment for materials torsion mechanical test. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 4, pp. 382-390. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-4-382-391

Металлы и сплавы на их основе еще не одно десятилетие будут оставаться основными конструкционными материалами, которые будут применяться в различных отраслях промышленности, на транспорте и в строительстве. Каждая отрасль современной техники предъявляет высокие требования к надежности изделий, а следовательно, и к таким их свойствам, как прочность, пластичность, твердость, вязкость, трещиностойкость, выносливость и др. При этом требования, предъявляемые потребителями в отношении механических, технологических и эксплуатационных свойств металлов и сплавов, в настоящее время выполняются металлургами в широком диапазоне. Таким образом, производители продукции черной и цветной металлургии имеют возможность удовлетворить самые разнообразные требования к данному виду конструкционных материалов, например, в отношении прочности и вязкости, формовости и свариваемости, стойкости к коррозии и износу.

Хотя наука о механических испытаниях имеет сравнительно короткую историю, но в настоящий момент в мире существует множество методик и видов оборудования для механических испытаний с целью определения различных характеристик испытываемых материалов. В зависимости от необходимости определения конкретных характеристик материалов могут использоваться испытания на растяжение/сжатие, кручение и др. Наиболее распространенным и часто используемым методом испытаний является растяжение [1], которое позволяет определять ряд важных механических характеристик испытываемых материалов, таких как пределы прочности и те-

куности, а также относительные удлинение и сужение. В данном случае реализуется схема напряженного состояния одноосного растяжения, и во время испытаний длина образцов увеличивается, затем происходит образование шейки и в конечном итоге их разрушение. Однако испытание на растяжение может применяться не во всех случаях, например, испытания малопластичных материалов могут быть затруднительны. Альтернативным методом определения механических характеристик материалов являются испытания цилиндрических образцов на кручение [2–8]. В данном случае реализуется схема напряженного состояния чистого сдвига, при этом образец не претерпевает формоизменения и во время испытания не образуется шейка. Метод испытания цилиндрических образцов на кручение также позволяет определить соответствующие механические характеристики испытываемых материалов. Имеющееся в настоящее время на рынке России и Казахстана оборудование для проведения испытаний на кручение в большинстве случаев произведено за пределами стран, входящих в состав ЕвразЭС. Производителями машин для испытания металлов на кручение являются, например, такие компании, как: Zwick Roell, США; Walter + Bai AG, Швейцария; TIME Group Inc., Infinity Machine International Inc., Китай, и др. В связи с этим была поставлена и решена задача проектирования и конструирования отечественного аналога оборудования для проведения механических испытаний цилиндрических образцов на кручение [9]. В данной работе представлены результаты опробования данного оборудования.

Оборудование

На кафедре обработки металлов давлением Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина разработан стенд (рис. 1) для механического испытания материалов на кручение, сопротивление деформации и пластичности, для исследования про-

цессов упрочнения и разупрочнения в зависимости от параметров нагружения: температуры, степени и скорости деформации в условиях однонаправленного и знакопеременного характера нагружения цилиндрических образцов.

Рис. 1. Стенд для испытаний на кручение:

1 — неподвижный захват; 2 — подвижный захват;
3 — щеточный узел; 4 — корпус; 5 — измерительный сен-
сор TCN-10k; 6 — редуктор Alphira115; 7 — интегриро-
ванный сервопривод СПШ10-340100; 8 — электросвароч-
ная контактная машина АСП-10;
9 — электрический шкаф

Fig. 1. Torsion test bench:

1 — fixed grip; 2 — movable grip; 3 — brush assembly;
4 — casing; 5 — measuring sensor TCN-10k; 6 — reducing
gear Alphira115; 7 — integrated servo drive СПШ10-340100;
8 — electric welding contact machine ASP-10;
9 — electrical cabinet

В качестве силовозбуждающего устройства используется интегрированный сервопривод СПШ10-34100 7, который через планетарный редуктор 6 с передаточным числом 10 передает крутящий момент на подвижный захват 2. Исследуемый образец одним концом крепится в подвижном, а другим — в неподвижном захвате 1. Крепление производится вручную с помощью торцевого ключа на 19 мм. Программы нагружения задаются с компьютера при помощи программного обеспечения “Мотомастер”. Исследуемый образец может быть подвергнут нагреву. Нагрев может производиться как перед, так и во время исследования. В качестве нагревателя используется сварочная контактная машина АСП-10 8. Вторичная обмотка трансформатора

подключена к неподвижному и подвижному захватам. Включение нагрева производится нажатием и удержанием в нажатом состоянии кнопки, расположенной на лицевой стороне стенда. Величина тока нагрева задается переключателями, расположенными на левой стороне стенда. Контроль величины нагрева производится пирометром GM 1850. По достижении заданной температуры кнопку нагрева следует отпустить.

Крутящий момент, соответствующий углу закручивания образца, считывается цифровым измерительным модулем ZET 7111, построенным на базе тензодатчика TCN-10k 5, показания которого регистрируются компьютером с помощью программного обеспечения ZETLAB. Показания момента и угла закручивания соответствуют одному и тому же моменту времени при испытании. Затем осуществляется обработка экспериментальной информации для расчета сопротивления деформации, степени и скорости деформации, анализа процессов упрочнения и разупрочнения. Алгоритм и программа расчета указанных параметров выполнены с учетом влияния температурных полей, которые определяются путем компьютерного моделирования процесса испытания. Пластичность материалов определяется в результате испытания образцов до разрушения. Технические характеристики стенда представлены в табл. 1.

**ТАБЛИЦА 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕНДА**

**TABLE 1. TECHNICAL SPECIFICATIONS
OF THE TEST BENCH**

Показатель	Величина
Потребляемая мощность (пиковая в момент нагрева), кВт	10
Ток нагрева, кА	3,7
Напряжение, В	220/380
Максимальный крутящий момент, передаваемый образцу, Н/м	70
Частота вращения активного захвата, об/мин:	
при знакопеременном кручении	6–30
при однонаправленном кручении	1–50
Температура нагрева образца, °С	1250 (макс.)

Выбор формы испытываемых образцов

Для выбора оптимальной формы рабочей зоны образцов для испытания на предложенном стенде было осуществлено компьютерное моделирование процесса однонаправленного кручения. В процессе моделирования были использованы образцы, имеющие разную конфигурацию рабочей зоны: с выточкой в форме шейки с соотношением $R/d = 1,25$ (рис. 2, а) и с плоской выточкой (см. рис. 2, б).

По результатам компьютерного моделирования проведен сравнительный анализ параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) с целью определения равномерности распределения данных параметров по длине рабочей зоны. Для этого на поверхности заготовок были нанесены 19 отслеживаемых точек (рис. 3). Граничные условия и материал образцов идентичны для обеих конфигураций. В качестве материала был выбран алюминий АД0. Деформация осуществлялась при температуре 20 °С без учета влияния теплопередачи.

В качестве сравниваемых параметров были взяты эквивалентная деформация (рис. 4, а), интенсивность касательных напряжений (см. рис. 4, б) и показатель Лоде (см. рис. 4, в) при угле закручивания 180 град.

Рис. 2. Размеры испытываемых образцов:
а — с выточкой в форме шейки; б — с плоской выточкой

Fig. 2. Dimensions of test samples:
а — recess in the form of a neck; б — flat recess

Рис. 3. Твердотельные модели образцов с отслеживаемыми точками:
а — с выточкой в форме шейки; б — с плоской выточкой

Fig. 3. Solid-state sample models with traceable points:
а — recess in the form of a neck; б — flat recess

Рис. 4. Распределение параметров напряженно-деформированного состояния по длине рабочей зоны образцов: а — эквивалентная деформация; б — интенсивность касательных напряжений; в — показатель Лоде

Fig. 4. Distribution of strain-stress state parameters along the length of the working area of samples: а — strain effective; б — intensity of tangential stresses; в — Lode index

Эквивалентная деформация позволяет оценить общий уровень накопленной деформации на любой стадии процесса.

Эквивалентная деформация определяется по формуле [10]:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ — главные деформации.

Интенсивность касательных напряжений T определяется по формуле [10]:

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (2)$$

где σ_1 — максимальное главное напряжение, МПа; σ_2 — среднее главное напряжение, МПа; σ_3 — минимальное главное напряжение, МПа.

Показатель Лоде позволяет оценить природу возникающей деформации в заготовке, т. е. определить, какой тип деформации реализуется в конкретной точке — растяжение, сжатие или сдвиг.

Расчет коэффициента Лоде ведется по формуле [10]:

$$\mu = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 \quad (3)$$

Как видно из рис. 4, а и б, форма рабочей зоны образца значительно влияет на картину распределения параметров НДС по ее длине. Так как по первой конфигурации образец имеет выточку в форме шейки, в месте наименьшего диаметра происходит значительное накопление эквивалентной деформации и интенсивности касательных напряжений. При второй конфигурации формы рабочей зоны, имеющей плоский вырез, параметры НДС распределяются более равномерно. Картина распределения показателя Лоде (см. рис. 4, в) в обоих случаях схожа, при этом значения данного показателя находятся в диапазоне от $-0,06$ до $0,06$, что свидетельствует о том, что осуществляется чистый сдвиг и что форма рабочей части образца в данном случае существенно не влияет на картину распределения данного показателя.

На основании сравнительного анализа для проведения лабораторного эксперимента предлагается использовать образцы второй конфигурации, имеющие плоскую выточку.

Подготовка эксперимента

Для проведения серии опытов было подготовлено девять образцов, имеющих рабочую область с плоской выточкой. Размеры образцов составили: длина — 140 мм, диаметр — 12 мм, диаметр рабочей зоны — 10 мм, длина рабочей зоны — 10 мм. Для фиксации образцов в подвижном и неподвижном захватах были сточены

небольшие области. Все испытания проводили в условиях холодной деформации без нагрева. Химический состав образцов представлен ниже:

Элемент	Содержание, %
Al	98,7
Si	0,66
Mg	0,64

Испытание каждого образца осуществляли при однонаправленном или знакопеременном кручении со значениями скорости и амплитуды знакопеременной деформации, представленными в табл. 2.

Вращение на активный захват осуществлялось при помощи программного обеспечения “Мотомастер”, поставляемого вместе с шаговым сервоприводом СПШ10-340100. Базовая версия программы не позволяла задавать произвольный закон деформирования, для этого был разработан алгоритм [11–13], позволяющий осуществлять любые режимы деформации, не превышающие технические характеристики стенда. Во всех случаях время деформации ограничивалось конечным вращением активного захвата, равным одному обороту, либо до разрушения образца.

Результаты и их обсуждение

По результатам проведенных испытаний на основании данных измерительного сенсора TCN-10k были построены графики крутящего момента (рис. 5). В случае однонаправленного кручения графики крутящего момента сравнили одновременно для трех образцов в зависимости от скорости вращения подвижного захвата. В случае знакопеременного вращения сравнение проводилось для образцов при одинаковой скорости вращения подвижного захвата, но с разной амплитудой знакопеременной деформации.

При однонаправленном кручении произошло разрушение всех трех образцов, причем с повы-

ТАБЛИЦА 2. РЕЖИМЫ ДЕФОРМАЦИИ

TABLE 2. DEFORMATION MODES

Номер образца	Деформация	Скорость, об/мин	Амплитуда, град.
1	Монотонная (однонаправленное кручение)	1	—
2	Знакопеременная	1	30
3	Знакопеременная	1	60
4	Монотонная (однонаправленное кручение)	5	—
5	Знакопеременная	5	30
6	Знакопеременная	5	60
7	Монотонная (однонаправленное кручение)	10	—
8	Знакопеременная	10	30
9	Знакопеременная	10	60

шением скорости вращения подвижного захвата разрушение образца происходило быстрее. Для знакопеременной деформации при скорости вращения активного захвата 1 об/мин разрушение не произошло. При повышении скорости до 5 и 10 об/мин разрушение образцов происходило во всех случаях знакопеременной деформации, однако при амплитуде 30 град. в обоих случаях образец выдерживал значительно большее количество циклов деформации в отличие от образцов, деформированных с амплитудой 60 град. Значение крутящего момента для всех образцов не превышало 5 кгс/м.

Рис. 5. Крутящий момент:

а — однонаправленное кручение; б — знакопеременное кручение со скоростью подвижного захвата 1 об/мин; в — знакопеременное кручение со скоростью подвижного захвата 5 об/мин; г — знакопеременное кручение со скоростью подвижного захвата 10 об/мин

Fig. 5. Torque:

а — unidirectional torsion; б — alternating torsion with the speed of movable grip 1 rpm; в — alternating torsion with the speed of movable grip 5 rpm; г — alternating torsion with the speed of movable grip 10 rpm

Выводы

Результаты компьютерного моделирования скручивания цилиндрических заготовок при одинаковых граничных условиях, но имеющих разную форму выточки, показали, что в случае с образцом, имеющим форму выточки в виде шейки с соотношением $R/d = 1,25$, происходит концентрированное накопление эквивалентной деформации и интенсивности касательных напряжений в зоне наименьшего диаметра. В случае использования образца, имеющего плоскую выточку, накопление вышеупомянутых параметров НДС осуществляется равномерно по длине рабочей зоны. Для апробации стенда на испытания на кручение были выбраны образцы, имеющие плоскую выточку. Для проведения эксперимента всего было изготовлено девять образцов, каждый из которых испытывали при различных схемах деформации: три образца — при однонаправленном кручении со скоростью закручивания активного захвата 1, 5

и 10 об/мин; три пары образцов — при знакопеременном кручении при двух амплитудах 30 и 60 град. с аналогичными скоростями закручивания активного захвата. В результате испытаний для каждого образца были построены графики крутящего момента, которые показали, что наибольшее влияние на количество циклов деформации до разрушения образца оказывает амплитуда при знакопеременной деформации: чем она ниже, тем большее количество циклов может выдержать образец до разрушения, что очень хорошо согласуется с результатами исследований, представленными в работе [14]. Это, в свою очередь, позволяет сделать вывод о том, что по результатам проведенной работы доказана как возможность использования сконструированного стенда для проведения механических испытаний материалов, так и достоверность получаемых результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. — М.: Стандартинформ, 2008.
2. ГОСТ 3565–80. Металлы. Метод испытания на кручение. — М.: Издательство стандартов, 1988.
3. Pedro Costa, Mário Vieira, Luis Reis etc. New specimen and horn design for combined tension and torsion ultrasonic fatigue testing in the very high cycle fatigue regime // *International Journal of Fatigue*. 2017. V. 103. P. 248–257.
4. Xiangru Wang, Dagang Wang, Dekun Zhang etc. Effect of torsion angle on tension-torsion multiaxial fretting fatigue behaviors of steel wires // *International Journal of Fatigue*. 2018. V. 106. P. 159–164.
5. Khoddam S., Hodgson P.D. A heuristic model selection scheme for representing hot flow data using the hot torsion test results // *Materials and Design*. 2010. V. 31. P. 2011–2017.
6. Khoddam S., Hodgson P.D. Post processing of the hot torsion test results using a multi-dimensional modelling approach // *Materials and Design*. 2010. V. 31. P. 2578–2584.
7. Jonas J.J., Montheillet F., Toth L.S. etc. Effects of varying twist and twist rate sensitivities on the interpretation of torsion testing data // *Materials Science & Engineering A*. 2014. V. 591. P. 9–17.
8. Biswas S., Beausir B., Toth L.S. etc. Evolution of texture and microstructure during hot torsion of a magnesium alloy // *Acta Materialia*. 2013. V. 61. P. 5263–5277.
9. Богатов А.А., Князев С.В., Толкушкин А.О. Новое научное оборудование на кафедре ОМД УрФУ // *Magnitogorsk Rolling Practice 2018: материалы III Молодежной научно-практической конференции*. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2018. С. 44–46.
10. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, И.Я. Поздеев, О.А. Ганаго и др. — М.: Металлургиздат, 1963. — 674 с.
11. Erpalov M.V., Pavlov D.A. Torsion testing method for cylindrical samples of continuous section // *Chernye Metally*. 2018. № 12. P. 72–76.
12. Erpalov M.V., Pavlov D.A. Control and experimental data processing in torsion testing with variable acceleration // *CIS Iron and Steel Review*. 2018. V. 16. P. 71–75.
13. Erpalov M.V., Kungurov E.A. Examination of hardening curves definition methods in torsion test // *Materials Physics and Mechanics*. 2018. V. 38. № 1. P. 82–89.
14. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. — 329 с.

Поступила 10 января 2020 г.

REFERENCES

1. *GOST 1497–84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie* [State Standard 1497–84. Metals. Tensile test methods]. Moscow: Standartinform, 2008. (In Russ.).
2. *GOST 3565–80. Metally. Metod ispytaniya na kruchenie* [State Standard 3565–80. Metals. Torsion test method]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1988. (In Russ.).
3. Pedro Costa, Mário Vieira, Luis Reis etc. New specimen and horn design for combined tension and torsion ultrasonic fatigue testing in the very high cycle fatigue regime. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 103, pp. 248–257.
4. Xiangru Wang, Dagang Wang, Dekun Zhang etc. Effect of torsion angle on tension-torsion multiaxial fretting fatigue behaviors of steel wires. *International Journal of Fatigue*, 2018, vol. 106, pp. 159–164.
5. Khoddam S., Hodgson P.D. A heuristic model selection scheme for representing hot flow data using the hot torsion test results. *Materials and Design*, 2010, vol. 31, pp. 2011–2017.
6. Khoddam S., Hodgson P.D. Post processing of the hot torsion test results using a multi-dimensional modelling approaches. *Materials and Design*, 2010, vol. 31, pp. 2578–2584.
7. Jonas J.J., Montheillet F., Toth L.S. etc. Effects of varying twist and twist rate sensitivities on the interpretation of torsion testing data. *Materials Science & Engineering A*, 2014, vol. 591, pp. 9–17.
8. Biswas S., Beausir B., Toth L.S. etc. Evolution of texture and microstructure during hot torsion of a magnesium alloy. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, pp. 5263–5277.
9. Bogatov A.A., Knyazev S.V., Tolkushkin A.O. *Novoe nauchnoe oborudovanie na kafedre OMD UrFU* [New research equipment at the Metal Forming Department of UrFU]. *Magnitogorsk Rolling Practice 2018: materialy III Molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Magnitogorsk Rolling Practice 2018: materials of the III youth scientific-practical conference]. Magnitogorsk: Izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2018, pp. 44–46. (In Russ.).
10. Tarnovskii I.Ya., Pozdееv I.Ya., Ganago O.A. etc. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metals forming]. Moscow: Metallurgizdat, 1963, 674 p. (In Russ.).
11. Erpalov M.V., Pavlov D.A. Torsion testing method for cylindrical samples of continuous section. *Chernye Metally*, 2018, no. 12, pp. 72–76.
12. Erpalov M.V., Pavlov D.A. Control and experimental data processing in torsion testing with variable acceleration. *CIS Iron and Steel Review*, 2018, vol. 16, pp. 71–75.
13. Erpalov M.V., Kungurov E.A. Examination of hardening curves definition methods in torsion test. *Materials Physics and Mechanics*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 82–89.
14. Bogatov A.A. *Mekhanicheskie svoystva i modeli razrusheniya metallov* [Mechanical properties and fracture models of metals]. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2002, 329 p. (In Russ.).

Received January 10, 2020