

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА

**В.П. Шумейко, Е.А. Горячев**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

Целью работы является достижение усталостно-прочностных свойств упрочнением сплава ВТ1-0 холодной обработкой давлением.

Холодная прокатка является распространённым методом упрочнения материалов и сплавов. Интерес к холодной прокатке в качестве деформационной схемы связан с тем, что прокатка является всесторонне исследованным процессом, который к тому же широко используется на практике.

Полученные методом интенсивной пластической деформации ультрамелкозернистые заготовки (диаметром 40 мм и более) были подвержены прокатке на стане с многовалковыми калибрами конструкции ЧПИ. В ходе прокатки были изготовлены стандартные цилиндрические образцы для исследования механических свойств на растяжение и проведения испытаний на усталостную прочность. Экспериментальные данные указывают на повышение прочностных характеристик наноструктурного титана в результате холодной прокатки.

Проведены пластометрические исследования на пластометре конструкции ЧПИ-2 по методике, разработанной на кафедре машин и технологий обработки материалов давлением ЮУрГУ. После пластометрических исследований образцов были проведены испытания по определению сопротивления деформации, временного сопротивления и твердости по Бринеллю.

Дробность деформации повышает предел текучести при всех степенях нагружения. Повышение  $\sigma_{0,2}$  и твердости свидетельствует об измельчении зерна.

Исследование пластичности титана ВТ1-0 при дробном нагружении показало, что с увеличением числа ступеней нагружения пластичность титана возрастает.

Эксперименты показали отсутствие значительного влияния отпуска на промежуточных ступенях нагружения на временное сопротивление и твердость титана.

*Ключевые слова: ультрамелкозернистый, равноканальное угловое прессование, наноструктурный, холодная прокатка, калибр, пластометр, сплав.*

Развитие современных отраслей промышленности предъявляет всё более высокие требования к качеству материалов и эксплуатационным свойствам изделий. Важной с этой точки зрения является разработка новых подходов к созданию перспективных материалов, обеспечивающих высокий уровень свойств. В связи с этим в последние годы большое внимание учёных вызывают наноструктурные материалы, обладающие уникальной структурой и свойствами [1].

Очень актуальна эта проблема в медицине. На данном этапе необходимо найти более надёжные материалы для изготовления новых имплантатов, протезов и инструментов для замены поврежденных частей тела человека. Современные хирургия и стоматология нуждаются в металлах и сплавах с высокой химической инертностью и адекватной механической прочностью.

Сейчас для этих целей используют лёгкие и прочные титановые сплавы. Однако до сих пор не найдено решение оптимального соотношения прочностных характеристик, которыми обладают легированные марки титановых сплавов, с максимальной биологической совместимостью (чему полностью соответствует чистый титан).

Имплантология отдаёт предпочтение титану из-за его преимуществ по сравнению с другими

металлами [2]. Проведённые эксперименты свидетельствуют о практически полной биологической совместимости титана и некоторых его сплавов с живой тканью, а так же титан не вызывает аллергических реакций. Титан очень мало ионизируется в физиологических растворах. Продукты его коррозии нетоксичны. Кроме того, они обычно не распространяются по всему организму, концентрируясь вблизи имплантата. В отличие от нержавеющей сталей и кобальтовых сплавов, многоцикловые характеристики титана не понижаются при контакте с солевыми средами, включая физиологические растворы [2].

Поэтому разработка и исследование новых эффективных методов обеспечивающих повышение механических свойств коммерчески чистого титана является весьма актуальной задачей для медицинского материаловедения.

Сплав ВТ5, широко применяемый в медицине в данное время, содержит ванадий, содержание которого в человеческом организме недопустимо.

Целью данной работы является достижение усталостно-прочностных свойств упрочнением сплава ВТ1-0, который не содержит вредных веществ, методами холодной обработки давлением.

Интенсивная пластическая деформация (ИПД) приводит к формированию ультрамелко-

зернистых неравновесных структур, которая оказывает значительное, а иногда коренное влияние на деформационное поведение и механические свойства металлов и сплавов. В процессе последующей пластической деформации происходит изменение исходного наноструктурного состояния. Характер этих изменений определяется схемой и условиями деформации [1]. На данный момент наноструктуры получены в чистых металлах, многих сплавах и сталях. Структурные элементы наноматериалов, полученных ИПД, имеют малый размер зёрен и большую протяженность неравновесных границ зёрен.

Распространенным методом интенсивной пластической деформации является метод равноканального углового прессования (РКУП) (рис. 1).

ИПД РКУ-прессование основано на деформации массивных образцов простым сдвигом. Заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися обычно под углом  $90^\circ$  [1]. РКУ прессование позволяет получать в массивных образцах технического чистого титана ВТ1-0 ультрамелкозернистую структуру с размером зерен  $0,3 \text{ мкм}$ , что приводит к более высоким значениям пределов прочности и текучести  $\sigma_{0,2} = 770 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_b = 790 \text{ МПа}$  по сравнению с исходным крупнозернистым (КЗ) титаном.

Ещё одним способом ИПД является всесторонняя ковка (рис. 2).

Данный процесс обычно сопровождается динамической рекристаллизацией. Всесторонняя ков-

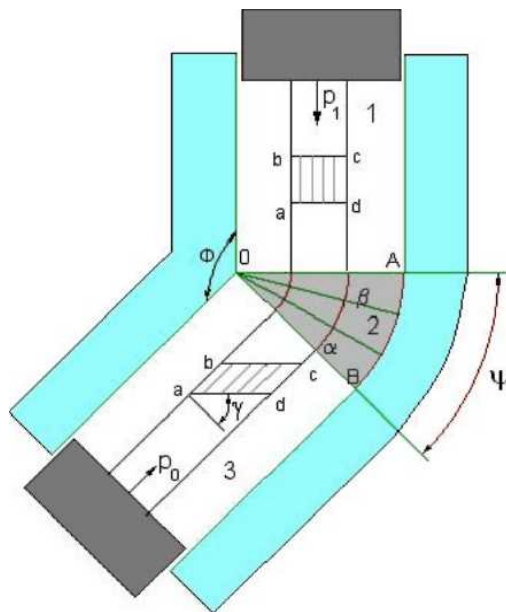


Рис. 1. Метод РКУ-прессования

ка основана на использовании многократного повторения: осадка – протяжка со сменой оси прилагаемого деформирующего усилия.

Так как обработку начинают с высоких температур,  $(0,3-0,6)T_{пл}$ , и обеспечивается небольшая удельная нагрузка на инструмент, такой способ позволяет получать наноструктурное состояние в хрупких материалах [1].

Полученные методом ИПД ультрамелкозернистые заготовки (диаметром от  $40 \text{ мм}$  и более) были

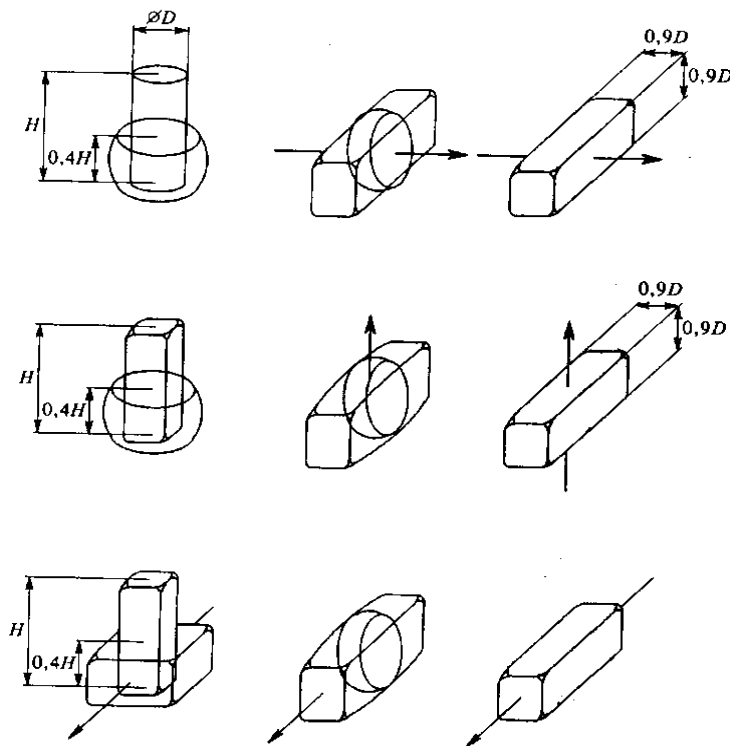


Рис. 2. Всесторонняя ковка

## Обработка металлов давлением

подвержены обработке давлением в холодном состоянии для получения заданных прочностных свойств.

Холодная прокатка является распространённым методом упрочнения материалов и сплавов. Интерес к холодной прокатке в качестве деформационной схемы связан с тем, что прокатка является всесторонне исследованным процессом, который к тому же широко используется на практике.

Для исследования режимов холодной деформации наноструктурного титана перспективным является прокатка на станах с четырёхсторонним обжатием, конструкции ЧПИ [3].

Прокатка с четырёхсторонним обжатием осуществляется в калибрах, образованных четырьмя валками, оси которых расположены в одной вертикальной плоскости (рис. 3).

В ходе прокатки были изготовлены стандартные цилиндрические образцы для исследования механических свойств на растяжение и проведения испытаний на усталостную прочность. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Данные таблицы указывают на повышение прочностных характеристик НС титана в результате холодной прокатки.

Так же разработана схема безкалиберной прокатки на гладкой бочке прокатного стана с диаметром валков 320 мм.

Механические свойства полученных образцов представлены в табл. 2.

Данные таблицы показывают более высокие характеристики прочности и пластичности НС титана в сравнении с КЗ при равной степени деформации, а так же более высокое суммарное упрочнение КЗ титана при резком снижении пластичности.

Прокаткой в калибрах образованных четырьмя валками показала возможность осуществления холодной упрочняющей обработки с суммарной степенью деформации до  $\epsilon = 90\%$ . Получены образцы сечением 14 мм с удовлетворительным качеством поверхности. Однако, для получения более стабильных условий деформирования необходимо провести исследования сопротивления деформации УМЗ титана.

С этой целью проведены пластометрические исследования на пластометре конструкции ЧПИ-2 по методике, разработанной на кафедре МиТОМД ЮУрГУ.

После пластометрических исследований образцов были проведены испытания по определе-

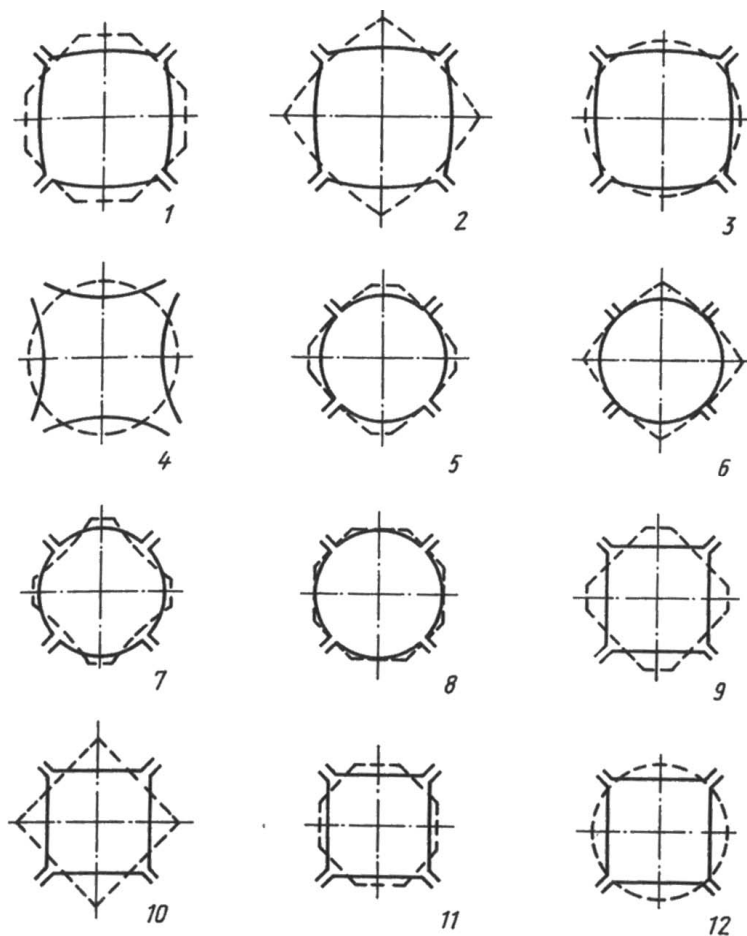


Рис. 3. Схемы прокатки в четырехвалковых калибрах

Таблица 1

Механические свойства титана в исходном, НС (РКУП) и холодном состояниях

Материал	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{-1}$ , МПа
Исходный	560	430	35	250
НС	765	670	23	310
НС + холодная прокатка	1010	900	17,5	460

Таблица 2

Механические свойства КЗ и НС титана в процессе холодной прокатки

Состояние	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
КЗ	790	750	9
НС	1010	900	13

нию сопротивления деформации, временного сопротивления и твердости по Бринеллю. Результаты исследования механических свойств холоднодеформированного титана при однократном нагружении приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, при увеличении степени деформации при однократном нагружении до 20 % условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) интенсивно растет с 605,6 % МПа ( $\epsilon = 2,8$  %) до 808,2 МПа ( $\epsilon = 19$  %), при дальнейшем увеличении степени деформации рост  $\sigma_{0,2}$  приостанавливается.

Временное сопротивление ( $\sigma_{0,2}$ ) в случае однократного нагружения до 20 % существенно не меняется, при дальнейшем нагружении  $\sigma_{0,2}$  возрастает с 748,8 МПа при  $\epsilon = 20,1$  % до 897, МПа при  $\epsilon = 59,5$  %. По аналогичной закономерности изменяется твердость по Бринеллю.

Как видно из табл. 4, дробность деформации повышает предел текучести при всех степенях нагружения. Повышение  $\sigma_{0,2}$  и твердости свидетельствует об измельчении зерна. Временное сопротивление при дробном деформировании значительно растет при  $\epsilon > 50$  %. Так, если при

$\epsilon = 50,4$  %  $\sigma_b = 802,4$  МПа при однократном нагружении, то при шестикратном нагружении до 52,9 % временное сопротивление достигает 992,8 МПа.

Твердость по Бринеллю при дробном нагружении изменяется аналогично временному сопротивлению, при однократном шестикратном нагружении ( $\epsilon = 50$  %) НВ возрастает с 236 до 292. То есть можно говорить об измельчении зерна.

Исследование пластичности титана ВТ1-0 при дробном нагружении показало, что с увеличением числа ступеней нагружения пластичность титана возрастает. Если при однократном нагружении макротрещины появляются при  $\epsilon = 48,6$  %, то при пятикратном нагружении разрушение наблюдается при  $\epsilon = 78,7$  %.

Было исследовано влияние отжига при многократном нагружении на отдельных стадиях нагружения с целью сохранности величины зерна и его влияние на механические характеристики титана ВТ1-0.

По данным табл. 3 построена кривая зависимости условного предела текучести в функции степени деформации. График кривой приведен на рис. 4.

Таблица 3

Результаты исследования механических свойств холоднодеформированного титана при однократном нагружении

№ п/п	Деформация $\epsilon$ , %	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Твердость, НВ
1	2,8	605,6	693,6	204
2	9,8	696,8	717,4	211
3	9,9	690,1	785,4	231
4	10,2	669,7	697,0	205
5	14,4	793,5	714,0	210
6	17,4	729,4	702	208
7	19,0	808,2	731,	215
8	19,4	801,5	758,2	223
9	20,1	796,8	748,0	220
10	21,1	775,4	737,8	217
11	41,1	800,9	799,0	235
12	50,4	792,2	802,4	236
13	58,8	801,6	829,6	244
14	59,5	821,7	897,6	264

Влияние дробности нагружения на механические свойства холоднодеформированного титана

№ п/п	Деформация $\epsilon$ , %	Количество ударов	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Твердость, НВ
1	10,0	1	685,5	733,3	216
2	10,0	2	708,8	720,8	212
3	19,9	1	795,5	743,8	219
4	20,1	4	804,4	744,6	219
5	50,4	1	792,2	802,4	236
6	52,9	6	833,4	998,8	292
7	56,6	1	805,2	843,2	248
8	55,8	3	880,1	867,0	255

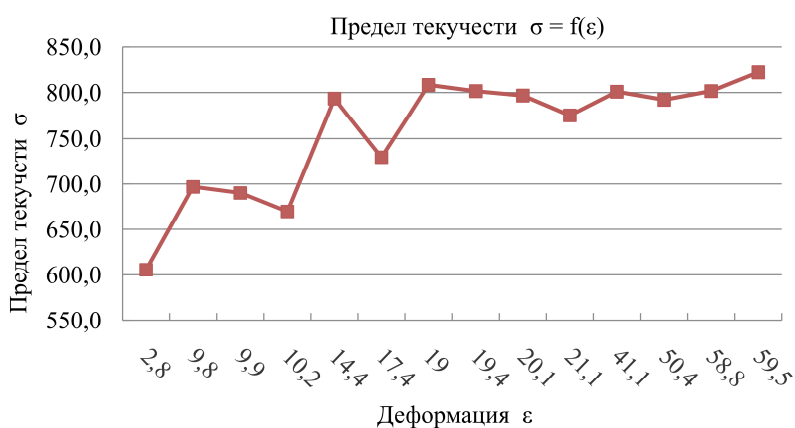


Рис. 4. График зависимости предела текучести от степени деформации

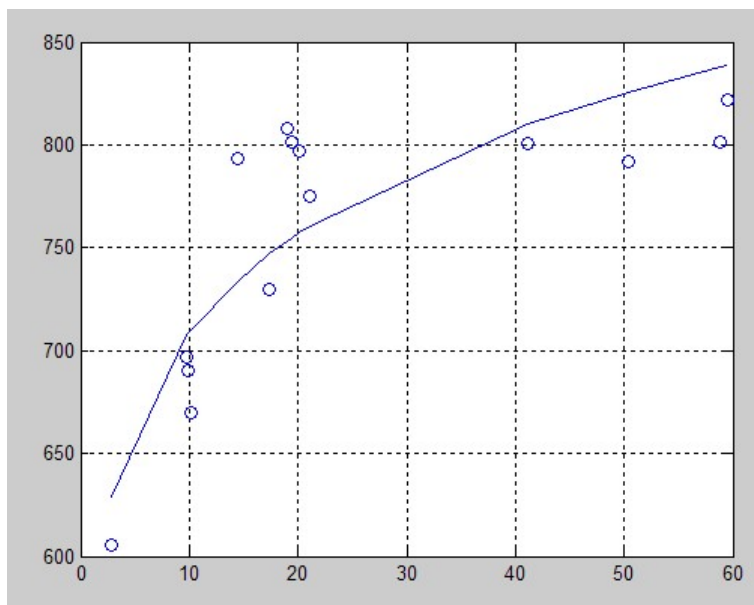


Рис. 5. График функции  $\sigma = a\epsilon^b$

По методике, разработанной на кафедре МиТОМД, получена формула для вычисления  $\sigma_{0,2}$  имеющая вид:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + a(100\epsilon)^b$$

Методы интерполяции и аппроксимации применяются при обработке экспериментальных ре-

зультатов. Задача интерполяции вычислить значения исследуемой функциональной зависимости между опорными точками. При этом часто строится функция, проходящая через опорные точки. Однако если экспериментальные данные зашумлены, такой подход не имеет смысла. В этом случае

используются методы аппроксимации, в которых строится функция, наилучшим образом проходящая через эти точки. Критерий – минимум суммы квадратов отклонений. Могут использоваться и другие критерии, например максимум функции правдоподобия.

Для построения функциональной зависимости воспользуемся программой MATLAB. Данные экспериментальной зависимости предела текучести от величины относительной деформации берём из табл. 3.

Программа аппроксимирует исходные точки графиком функции  $\sigma = a\varepsilon^b$ .

Коэффициенты  $a$  и  $b$  вычисляются по методу наименьших квадратов. Чтобы свести вычисления к решению линейной системы уравнений выполняется предварительное логарифмирование исходных данных.

Результаты расчетов представлены на рис. 5. Из рис. 5 видно, что график функции  $\sigma = a\varepsilon^b$  с достаточной степенью точности описывает

экспериментальные данные, приведенные на рис. 4.

Для получения более высокой степени упрочнения при суммарной деформации  $\varepsilon > 90\%$  возможен способ дозированной деформации прокаткой с переменным обжатием.

#### Литература

1. Валиев, Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.

2. Валиев, Р.З. Разработка наноструктурного титана медицинского применения / Р.З. Валиев, В.В. Столяров, В.В. Латыш // *New Technologies for the 21 Century*. – 2001. – № 5. – С. 19.

3. Прокатка малопластичных металлов с многосторонним обжатием / Л.А. Барков, В.Н. Выдрин, В.В. Пастухов, В.Н. Чернышев. – Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение, 1988. – 304 с.

**Шумейко Валентина Павловна**, студент кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; ShumeikoVP@gmail.com.

**Горячев Евгений Александрович**, доцент кафедры машин и технологий обработки материалов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; goriachevea@susu.ru.

Поступила в редакцию 20 июня 2016 г.

DOI: 10.14529/met160315

## INVESTIGATION OF COLD ROLLING PARAMETERS OF ULTRAFINE GRAINED TITANIUM

V.P. Shumeyko, ShumeikoVP@gmail.com,

E.A. Goryachev, goriachevea@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The objective of the work was achieving fatigue and strength properties of commercial titanium VT1-0 by hardening in cold working process.

Cold rolling is a common method of hardening of materials and alloys. The interest to cold rolling as a deformation scheme is due to the fact that rolling process is fully explored and widely used in practice.

Ultra-fine grained blanks (diameter 40 mm and above) received by severe plastic deformation process were rolled on CNC (computerized numerical control) cluster mill. Standard cylindrical samples for determining tensile and compression properties and fatigue-strength test were made by rolling. Experimental data show an increase of strength characteristics of nanostructural titanium as a result of cold rolling.

Samples were also investigated with the CNC-2 plastometer by the method developed by the Machines and Technology of Material Deformation Processes Department of the South Ural State University. After plastometric research the samples were tested to determine deformation resistance, tensile strength and Brinell hardness.

Divisibility of deformation increases yield point for all stressing degrees. Increase of  $\sigma_{0.2}$  and hardness is a witness of grain refinement.

The plasticity research of commercial titanium under divisional stress shows that plasticity of titanium increases with increasing number of stress degrees.

Tests showed no significant effect of tempering at intermediate stress degrees on tensile strength and hardness of titanium.

*Keywords: ultrafine-grained; equal channel angular pressing; nanostructural titanium; cold rolling; groove; plastometer; alloy.*

### References

1. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey* [Nanostructural Materials Obtained by Severe Plastic Deformation]. Moscow, Logos Publ., 2000. 272 p.
2. Valiev R.Z., Stolyarov V.V., Latysh V.V. [Development of Nanostructural Titanium for Medical Applications]. *New Technologies for the 21 Century*, 2001, no. 5, p. 19. (in Russ.)
3. Barkov L.A., Vydrin V.N., Pastukhov V.V., Chernyshev V.N. *Prokatka maloplastichnykh metallov s mnogostoronnim obzhatiem* [Rolling of Low-Plasticity Metals with Multi-Side Reduction]. Chelyabinsk, Metallurgiya Publ., Chelyabinsk Branch, 1988. 304 p.

*Received 20 June 2016*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шумейко, В.П. Исследование параметров холодной прокатки ультрамелкозернистого титана / В.П. Шумейко, Е.А. Горячев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 104–110. DOI: 10.14529/met160315

### FOR CITATION

Shumeyko V.P., Goryachev E.A. Investigation of Cold Rolling Parameters of Ultrafine Grained Titanium. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 104–110. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160315

---