

УДК 669.15

*А.В. Боткин<sup>1</sup>, Р.З. Валиев<sup>1,2</sup>, А.А. Кубликова<sup>1</sup>, С.В. Дубинина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет

<sup>2</sup> Институт физики перспективных материалов НИЧ УГАТУ (г. Уфа)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ СДВИГЕ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ КРУЧЕНИЕМ, СОВМЕСТНЫМ С РАСТЯЖЕНИЕМ (СЖАТИЕМ)\*

**Аннотация.** Показано влияние отношения осевой и угловой скоростей деформирования на напряженное состояние образцов при кручении, совместном с растяжением (сжатием). На основе испытаний образцов кручением, совместным с растяжением (сжатием), предложена методика определения пластичности металла.

**Ключевые слова:** пластичность металла, напряженное состояние, поврежденность металла, кручение образцов.

## INVESTIGATION OF METAL PLASTICITY IN SHEAR BASED ON RESULTS OF SAMPLE TESTS BY MEANS OF TORSION COMBINED WITH TENSION (COMPRESSION)

**Abstract.** The influence of the ratio of axial and angular velocities of deformation on the stress state of samples under torsion combined with tension (compression) is shown. The technique of metal plasticity estimation based on the sample test by means of torsion combined with tension (compression) is proposed.

**Keywords:** metal plasticity, stress state, metal damage, torsion of samples.

Для расчета основных технологических параметров процесса обработки металлов давлением (силы деформирования, формоизменения заготовки, поврежденности металла и т.д.) необходимы экспериментальные данные о сопротивлении деформации и пластичности металлов.

Обработка заготовок по схеме деформации, близкой к сдвигу, осуществляется в следующих процессах: прокатка тонких листов, волочение тонкостенных труб на цилиндрической оправке, деформация металла в конусе захвата при прошивке сплошных заготовок способом винтовой прокатки, интенсивная пластическая деформация (ИПД) угловым прессованием и др.

Основными требованиями, предъявляемыми к испытаниям образцов на пластичность, являются постоянство напряженного состояния этих образцов и сохранение монотонности деформации в течение всего опыта, высокая точность определения параметров напряженно-деформированного состояния в месте разрушения, обеспечение изменения показателей напряженного состояния в диапазоне, достаточном для анализа различных способов обработки металлов давлением, простота и удобство реализации испытания, возможность достижения высоких деформаций. Последнее требование имеет большое значение для процессов ИПД, так как в них реализуется деформация заготов-

ки, близкая к сдвигу, в частности, при равноканальном угловым прессованием (РКУП), когда заготовка проходит через зону сопряжения каналов приблизительно равных поперечных сечений, выполненных в специальной оснастке. Такая форма инструмента позволяет многократно деформировать заготовку и достигать высоких ( $\varepsilon_i = 4 \div 8$ ) значений деформации, что является одним из необходимых условий при формировании ультрамелкозернистой структуры материала.

Для исследования пластичности металла в условиях плоской деформации в литературе предложены различные испытания: растяжение и изгиб плоских образцов [1]; кручение цилиндрических образцов [2]; кручение цилиндрических образцов в камере высокого давления [2]; внедрение плоского и клинового инденторов в пластическое полупространство [1]; выдавливание мембран в камере высокого давления [2] и др.

Кручение цилиндрических образцов в камере высокого давления наиболее полно удовлетворяет вышеуказанным требованиям, но имеет существенный недостаток – изготовление и эксплуатация оборудования для реализации этой схемы испытания характеризуется большими материальными и финансовыми затратами, трудоемкостью, сложностью. Поэтому разработка простой в реализации методики исследования пластичности металла с высоким ( $\varepsilon_i > 1$ ) уровнем накопленной деформации при схеме, близкой к сдвигу, является актуальной задачей.

Последние два десятилетия характеризуются активным использованием вычислительной техники, различ-

\* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России и Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проектов РФФИ № 12-08-01104-а, № 12-08-3140312.

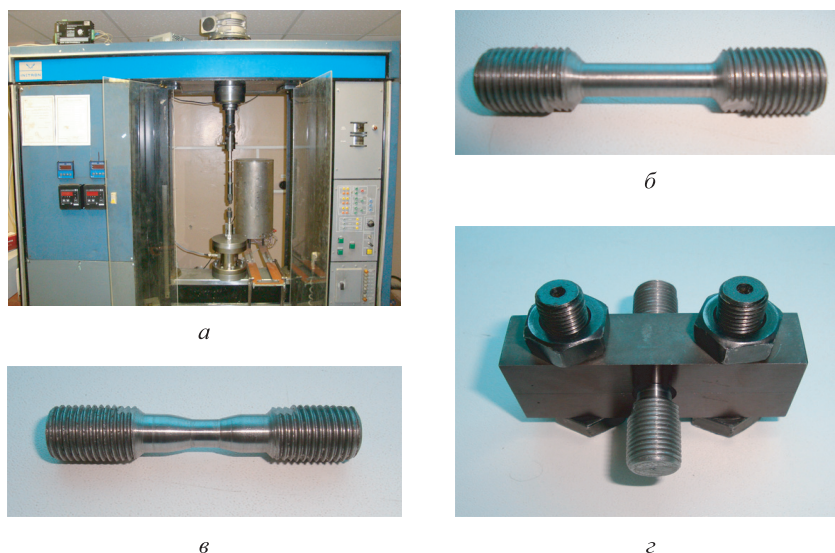


Рис. 1. Экспериментальный измерительный комплекс для исследования пластичности металла (а) и исходные образцы для кручения, совместного с растяжением (б), для кручения, совместного со сжатием (в), для кручения, совместного со сжатием в оправке (г)

ных программных комплексов (DEFORM 3D и др.) для расчета новых способов обработки металлов давлением, что, в свою очередь, активизировало разработку и развитие расчетно-экспериментальных методов и методик исследования этих процессов.

Цель настоящей работы – показать применение кручения, совместного с растяжением (сжатием), образцов в совокупности с результатами компьютерного моделирования их напряженного состояния для получения количественной зависимости пластичности металла от показателя напряженного состояния. Такая совокупность результатов необходима для расчета поврежденности металла в процессах обработки давлением при схеме деформации, близкой к сдвигу.

В качестве объектов исследований использовали образцы, изготовленные из стали 10 в виде прутков диам. 18 мм в состоянии поставки.

Испытания образцов (рис. 1, б – г) до разрушения проводили в специально изготовленном экспериментальном измерительном комплексе (рис. 1, а), предназначенном для исследования пластичности металла на основе результатов деформирования образцов кручением, совместным с растяжением (сжатием). Комплекс изготовлен на базе модернизированной испытательной машины Инстрон. Модернизация<sup>1</sup> включала монтаж двигателя и редуктора для осуществления вращательного движения верхнего захвата; монтаж универсального датчика измерения момента и силы, угла закручивания образца; изготовление и монтаж захватов; монтаж аналогового цифрового преобразователя сигнала; монтаж электронного регулятора осевой и угловой скоростей движения захватов. Комплекс снабжен нагревательным устройством, оборудован

компьютером с управляющей программой для обработки сигналов датчиков измерения момента, силы, угла и регулирования скоростей движения захватов. При использовании нагревательного устройства возможно проводить исследования пластичности металла при температурах до 650 °С.

Измерительный комплекс позволяет деформировать образцы по следующим механическим режимам: кручение, совместное с растяжением; кручение, совместное со сжатием; кручение, совместное со сжатием в оправке (см. таблицу). Для повторяемости экспериментальных результатов в каждом испытании деформировали по три образца. Форма и размеры образцов приведены на рис. 2.

Интенсивность деформации  $\varepsilon_{i,p}$  (меру пластичности), накопленной металлом на поверхности рабочей части образца, для растяжения с кручением и для кручения рассчитывали по формуле

$$\varepsilon_{i,p} = \ln \left( \frac{l_k}{l_0} \right) + \frac{\ln \left( 1 + \lambda^2 / 2 + \lambda \sqrt{1 + \lambda^2 / 4} \right)}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

где  $l_0$  и  $l_k$  – начальная и конечная длина рабочей части образца;  $\lambda = \alpha \bar{d} / (2\bar{l})$  в соответствии с формулой Надаи;  $\alpha$  – угол закручивания образца, рад;  $\bar{d}$  и  $\bar{l}$  – средний наружный диаметр и длина рабочей части образца.

Для расчета при сжатии с кручением трубчатых образцов использовали формулу

$$\varepsilon_{i,p} = \ln \left( \frac{h_0}{h_k} \right) + \frac{\ln \left( 1 + \lambda^2 / 2 + \lambda \sqrt{1 + \lambda^2 / 4} \right)}{\sqrt{3}}; \quad (2)$$

здесь  $h_0$  и  $h_k$  – начальная и конечная высота рабочей части образца;  $\lambda = \alpha \bar{d} / (2\bar{h})$ ;  $\bar{h}$  – средняя высота рабочей части образца.

<sup>1</sup> Модернизация испытательной машины Инстрон выполнена в ИФПМ УГАТУ под руководством Г.И. Рааба.

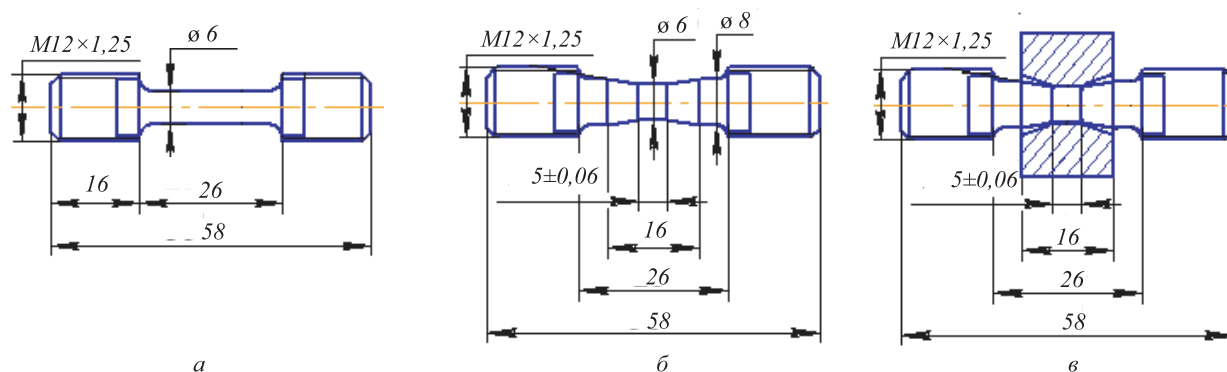


Рис. 2. Формы и размеры образцов

Для исследования напряженно-деформированного состояния образцов выполняли компьютерное моделирование пластического деформирования образцов в программном комплексе DEFORM 3D<sup>2</sup>. При проведении компьютерного моделирования были приняты следующие условия и допущения: захваты – абсолютно жесткие тела (3D-модели захватов были предварительно созданы в «КОМПАС 3D V12»); температура – постоянная, 20 °С; тепловым эффектом деформации из-за малой скорости деформации пренебрегали; стальные образцы – пластичные тела; кривую упрочнения стали 10, соответствующую комнатной температуре (линию тренда, построенную по результатам механических испытаний прерывистым растяжением с промежуточными закручиваниями образца, в соответствии с методикой работы [3]), вводили при подготовке базы данных в виде табличной функции; коэффициент трения по закону Зибеля принимали равным 0,12; плотность равномерной сетки конечных элементов составляла 32 мм<sup>-3</sup>; значения угловой скорости подвижного захвата принимали равными 1,5 и 0,15 об/мин; значения осевой скорости деформирования выбирали в промежутке от –20 до 20 мм/мин.

### Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния образцов кручением, совместным с растяжением (сжатием)

Расчету средних значений показателей напряженного состояния образца (точек поверхности рабочей части образца) за время испытания предшествовала настройка конечно-элементной модели пластического деформирования образца. Для настройки сравнивали графические зависимости силовых параметров (силы  $P$  и момента  $M$  от времени  $t$ ) деформирования образца, полученных при моделировании и в эксперименте.

Относительная разность ординат точек указанных графических зависимостей (рис. 3, кривые 1 и 4) не превышала 10 % при плотности сетки конечных элементов не менее 32 мм<sup>-3</sup>.

Образец разрушался в эксперименте при указанном отношении скоростей деформирования примерно через 80 с на начальной стадии образования шейки (рис. 3, кривая 1). При моделировании сила и момент пример-

### Механические режимы деформирования образцов

№	Вид испытания	$v_d/\omega_d$ , мм/мин об/мин	$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i}\right)_{cp}$	$\left(\frac{\sqrt{3}\sigma_0}{\sigma_i}\right)_{cp}$	$\varepsilon_i$
1	Кручение, совместное с растяжением	0,5/1,5	0,59	0,05	3,83
		2,0/1,5	0,63	0,29	3,38
		10,0/1,5	0,82	0,32	3,13
		20,0/1,5	0,93	0,49	2,65
2	Кручение, совместное со сжатием	–2,0/0,15	0,13	–0,46	1,88
		–20,0/1,5	0,14	–0,46	1,81
		–7,0/1,5	0,38	–0,21	2,41
3	Кручение, совместное со сжатием в оправке	–0,5/1,5	0,41	–0,24	2,93
		–2,0/1,5	0,06	–0,83	3,34

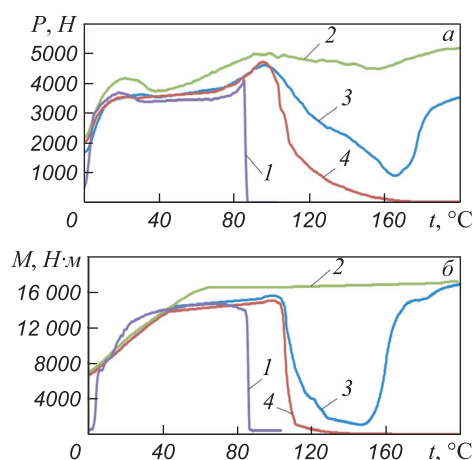


Рис. 3. Графические зависимости силы деформирования от времени (а), момента от времени (б) при кручении, совместном с растяжением, образца со скоростями  $\omega = 1,5$  об/мин,  $v = 2$  мм/мин, полученные:  
1 – экспериментально; 2 – моделированием с плотностью сетки 11 мм<sup>-3</sup>; 3 – моделированием с плотностью сетки 21 мм<sup>-3</sup>; 4 – моделированием с плотностью сетки 32 мм<sup>-3</sup>

<sup>2</sup> Лицензия. P.C. SFTC. Key#9190/ Ufa, Russia.

но через 100 с деформирования достигали максимальных значений и затем монотонно уменьшались (рис. 3, кривая 4), что соответствовало непрерывному уменьшению поперечного сечения шейки образца. Силовые параметры кручения, совместного с растяжением, образца, полученные моделированием при грубой сетке (рис. 3, кривые 2 и 3), не соответствовали экспериментальным данным.

На рис. 4 приведены графические зависимости показателей напряженного состояния точек поверхности образцов (рабочей части образца) от деформации, накапливаемой при комбинированном кручении с различными по величине скоростями (осевой и угловой) деформирования, но при одинаковом их отношении. Видно, что показатели напряженного состояния образцов с увеличением деформации при деформировании с различными по величине скоростями, но при одинаковом отношении скоростей изменяются качественно и количественно одинаковым образом. Средние значения показателей напряженного состояния точек поверхности образцов при одинаковом отношении скоростей отличаются на 7 %.

Отношение осевой и угловой скоростей деформирования и наличие оправки существенно влияют на показатели напряженного состояния поверхностных точек рабочей части образцов (рис. 4, в – д). Увеличение отношения скоростей обуславливает увеличение показателей напряженного состояния образцов.

Локальный максимум (рис. 4, д) соответствует выборке зазора между образцом и оправкой на начальной

стадии деформирования образца. Усреднение значений показателей напряженного состояния образца (точек поверхности рабочей части образца) за время испытания выполняли по известным формулам:

$$\left( \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{\text{ср}} = \frac{1}{\varepsilon_i} \int_0^{\varepsilon_i} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon;$$

$$\left( \frac{\sigma_0 \sqrt{3}}{\sigma_i} \right)_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{3}}{\varepsilon_i} \int_0^{\varepsilon_i} \frac{\sigma_0}{\sigma_i} d\varepsilon,$$

где  $\sigma_1$  – главное нормальное напряжение;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций;  $\sigma_0$  – среднее напряжение.

Изменение отношения скоростей от 20,0/1,5 до –2,0/1,5 в испытаниях образцов кручением, совместным с растяжением (сжатием), при отсутствии и наличии оправки позволяет изменять напряженное состояние образцов: показатель  $(\sigma_1/\sigma_i)_{\text{ср}}$  точек поверхности рабочей части образца изменяется от 0,93 до 0,06, показатель  $(\sqrt{3}\sigma_0/\sigma_i)_{\text{ср}}$  изменяется от –0,83 до 0,49.

На рис. 4, е приведена графическая зависимость контактного нормального напряжения  $\sigma_{\text{н max}}$  (абсолютной величины максимального контактного нормального напряжения) на поверхности оправки от времени, позволяющая рассчитать графическую зависимость силы действия образца на одну половину оправки от времени. Эта сила при кручении, совместном со сжатием, образца в оправке способствует раскрытию стыка между половинами оправки. Для исключения раскры-

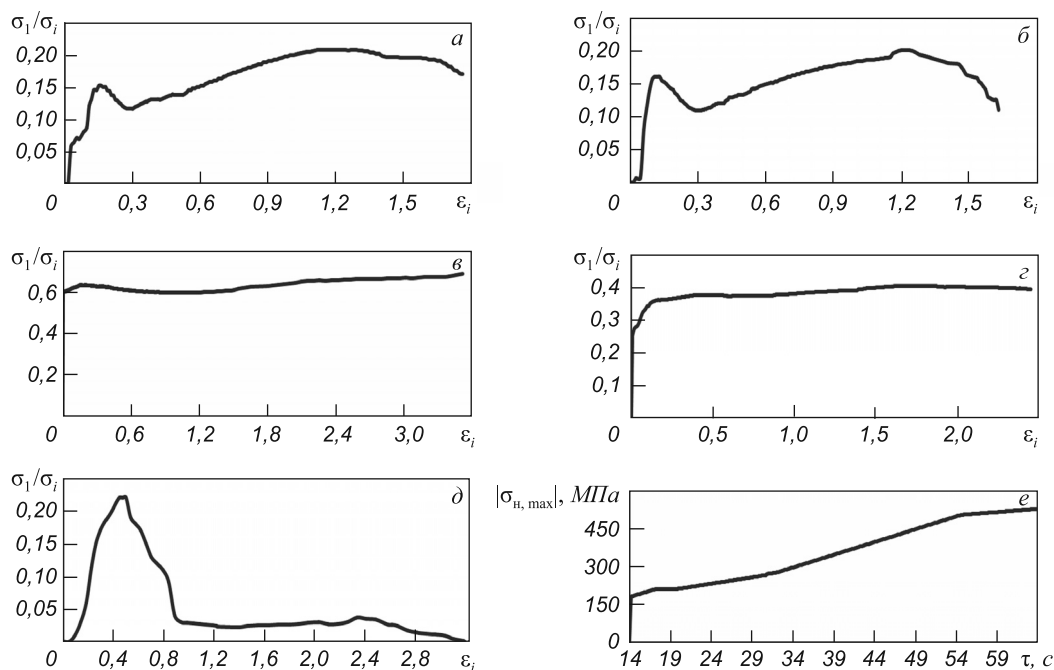


Рис. 4. Графические зависимости показателей напряженного состояния точек поверхности образцов (рабочей части образца) от деформации и времени (а – д) и абсолютной величины максимального контактного нормального напряжения на поверхности оправки от времени (е): а – при отношении скоростей –2,0 мм/мин / 0,15 об/мин; б – при отношении скоростей –20,0 мм/мин / 1,5 об/мин; в – при отношении скоростей 2,0 мм/мин / 1,5 об/мин; г – при отношении скоростей –7,0 мм/мин / 1,5 об/мин; д – при отношении скоростей –2,0 мм/мин / 1,5 об/мин и наличии оправки



тия стыка сила затяжки каждого из двух болтовых соединений (рис. 1, з) должна составлять не менее одной второй от максимальной силы раскрытия стыка. Обеспечить необходимую силу затяжки возможно путем применения динамометрического ключа, настроенного на момент после предварительного расчета момента затяжки по необходимой силе затяжки болтового соединения, определяемой по максимальной силе раскрытия стыка между половинами оправки, которая определяется с использованием графика (рис. 4, е).

### Результаты экспериментального деформирования образцов и методика определения пластичности $\varepsilon_i(\sigma_1/\sigma_i)$ металла в зависимости от показателя напряженного состояния $\sigma_1/\sigma_i$

В результате экспериментального комбинированного деформирования образцов до разрушения, последующих измерений линейных, угловых размеров и расчета интенсивности деформации  $\varepsilon_{ip}$ , накопленной металлом к моменту появления трещины на поверхности образца, получили данные о пластичности стали 10 при комнатной температуре и различном напряженном состоянии, которые приведены ниже:

$(\sigma_1/\sigma_i)_{cp}$	0,590	0,630	0,820	0,930	0,130	0,150	0,410	0,058
$\varepsilon_{ip}$	1,64	1,52	1,25	1,02	3,56	3,32	2,09	4,55

Большинство образцов (за исключением образцов в оправке) разрушалось с зарождением трещины на поверхности в центральной части. Образцы в оправке разрушались с зарождением трещины на поверхности в месте локализации деформации, находящемся в цилиндрическом участке оправки. Длина визуальной трещины составляла 3 – 4 мм, ориентировка трещины – 84 – 90° к продольной оси закрученного образца.

Приведенные данные о пластичности стали 10 хорошо аппроксимируются зависимостью  $\varepsilon_{ip} = -1,26 \ln(\sigma_1/\sigma_i) + 0,968$ .

Аналогичные исследования были выполнены для широко применяемых в производстве крепежа марок сталей для холодной объемной штамповки в условиях ОАО «Белебеевский завод Автономаль»: 20Г2Р, 30Г1Р, 15ХГНМ, 12Г1Р, 38ХГНМ, 40ХН2МА, 41Х1, Сталь 20.

На основе результатов испытаний образцов кручением, совместным с растяжением (сжатием), разработанная методика исследования пластичности металла при деформации, близкой к сдвигу. Эта методика включает следующие этапы.

– Проведение исследований с использованием экспериментального измерительного комплекса – кручение, совместное со сжатием (растяжением), образцов при различном отношении осевой  $v_d$  и угловой  $\omega_d$  скоростей деформирования, определение деформации

$\varepsilon_{ip}$ , накопленной к моменту разрушения образца. Для определения деформации  $\varepsilon_{ip}$  необходимо после деформирования образца измерить угол закручивания образца до разрушения или вычислить его по формуле  $\alpha = \omega_d t_d$ , где  $t_d$  – время деформирования образца до разрушения; измерить диаметры  $d_n$ ,  $d_k$  и длины  $l_n$ ,  $l_k$  рабочей части образца до и после разрушения; применить соответствующие формулы, приведенные выше, для расчета деформации, накопленной металлом к моменту разрушения.

– Обработка результатов экспериментального определения накопленной к моменту разрушения образцов деформации  $\varepsilon_{ip}$  и результатов моделирования напряженного состояния образцов при испытании с применением известных средств Microsoft Excel для получения функциональной зависимости  $\varepsilon_{ip}(\sigma_1/\sigma_i)$ .

В практике расчетов в нашей стране наибольшее распространение получили методики оценки поврежденности металла В.Л. Колмогорова, А.А. Богатова, за рубежом – методика Кокрофта-Латама, которая установлена в программном комплексе DEFORM 3D по умолчанию как основная методика прогнозирования разрушения металла при пластической деформации. Согласно модели Кокрофта-Латама относительная работа элементарной положительной силы, действующей на материальную точку тела в процессе деформации, характеризует поврежденность металла. Разрушение металла происходит при достижении работой критического значения показателя Кокрофта-Латама  $\varepsilon_{ip}(\sigma_1/\sigma_i)$ , которое зависит от схемы напряженного состояния материальной точки тела. Для использования указанных выше моделей прогнозирования разрушения металла в процессах обработки металлов давлением требуется знать зависимость пластичности от показателя напряженного состояния  $\varepsilon_{ip}(\sqrt{3}\sigma_0/\sigma_i)$  для моделей В.Л. Колмогорова, А.А. Богатова и  $\varepsilon_{ip}(\sigma_1/\sigma_i)$  для модели Кокрофта-Латама. Испытания образцов кручением, совместным с растяжением (сжатием), позволяют в достаточно широком диапазоне определять пластичность металла в зависимости от показателя напряженного состояния при деформации, близкой к сдвигу. Разработанная методика с использованием образцов, размеры которых приведены на рис. 2, позволяет исследовать пластичность металла при температуре до 650 °С, при изменении показателей напряженного состояния  $\sigma_1/\sigma_i$  в пределах от 0,06 до 0,93,  $\sqrt{3}\sigma_0/\sigma_i$  – от –0,83 до 0,49.

**Выводы.** Установлено влияние отношения осевой и угловой скоростей деформирования образца при испытании кручением, совместным с растяжением (сжатием), на показатели напряженного состояния: уменьшение этого отношения приводит к уменьшению показателей напряженного состояния образца. Разработан и изготовлен экспериментальный измерительный комплекс, а также разработана методика исследования пластичности металла в термомеханических условиях деформации, близкой к сдвигу,

путем совместного кручения и растяжения (сжатия) образцов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Учебное пособие для вузов. – Екатеринбург: изд. УГТУ–УПИ, 2002. – 329 с.

2. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
3. Боткин А.В., Бикбулатова В.З., Степин П.С. // Кузнечно-штамповочное производство. 2008. № 11. С. 24 – 27.

© 2013 г. А.В. Боткин, Р.З. Валиев,  
А.А. Кубликова, С.В. Дубинина  
Поступила 24 января 2013 г.

УДК 669.018:539.2

**А.И. Потекаев<sup>1</sup>, В.В. Кулагина<sup>2</sup>, М.Д. Старостенков<sup>3</sup>,  
А.А. Клопотов<sup>1</sup>, Т.Н. Маркова<sup>4</sup>, М.М. Морозов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова Томского государственного университета

<sup>2</sup> Сибирский государственный медицинский университет (г. Томск)

<sup>3</sup> Алтайский государственный технический университет (г. Барнаул)

<sup>4</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

## СЛАБОУСТОЙЧИВЫЕ ПРЕДПЕРЕХОДНЫЕ СОСТОЯНИЯ, ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПОРЯДОК – БЕСПОРЯДОК И СТРУКТУРНЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ В СПЛАВЕ $\text{Cu}_3\text{Au}$

**Аннотация.** Исследованы слабуюстойчивые состояния и особенности структурных изменений в области фазовых переходов на примере бинарного сплава  $\text{Cu}_3\text{Au}$ . Выявлены особенности термоактивируемых перестроек структуры на микро-, нано- и макроструктурных уровнях бинарного сплава  $\text{Cu}_3\text{Au}$  при отклонении от стехиометрического состава. Показано, что в окрестности структурно-фазовых превращений в сплавах  $\text{Cu}_3\text{Au}$  в области 75 % Cu (ат.) реализуются слабуюстойчивые состояния, в которых наблюдается целый спектр аномальных явлений, подготавливающих систему к превращению.

**Ключевые слова:** слабуюстойчивые состояния, структурные перестройки, фазовые переходы.

## LOW-STABILITY PRE-TRANSITIONAL STATES, PHASE ORDER-DISORDER TRANSITION AND STRUCTURAL TRANSFORMATION IN $\text{Cu}_3\text{Au}$ ALLOY

**Abstract.** The low-stability states and structural peculiarities in the phase transition area of the  $\text{Cu}_3\text{Au}$  binary alloy are investigated. The thermal reconstruction characteristics of the binary alloy in case of its stoichiometric composition deviation were revealed on the micro, nano and macro structural scales. It is shown that in the vicinity of the structural phase transition of the  $\text{Cu}_3\text{Au}$  alloy at the 25 at. % Au domain the low-stability states arise which exhibits the whole range of abnormal phenomena responsible for the system transformation inducement.

**Keywords:** low-stability states, structural reconstructions, phase transitions.

Фазовый переход порядок – беспорядок – это один из типов важных фазовых переходов, происходящих в металлических сплавах, причем отличительными чертами такого перехода являются диффузионный характер превращения и взаимосвязь дальнего и ближнего порядков в расположении атомов с группами симметрии фаз, т.е. структурными особенностями системы. Исследования природы и закономерностей превращений порядок – беспорядок в металлических системах были начаты в начале XX столетия и продолжают в настоящее время. Сохранение интереса к фазовым переходам порядок – беспорядок определяется тем, что эти превращения существенно влия-

ют на свойства сплавов и достаточно широко распространены.

Ряд обзорных работ, посвященных проблеме атомного упорядочения и его влиянию на свойства сплавов, написаны в разное время (например, работы [1 – 21]), диссертация Н.В. Горлова<sup>1</sup>). Однако пока слабо изучены структурно-фазовые состояния вблизи фазового перехода порядок – беспорядок и взаимовлияние фазового перехода и структурных превращений в этих слабуюстойчивых состояниях.

По этой причине в настоящей работе была поставлена задача изучить одновременно на микро-, нано- и макроуровнях слабуюстойчивые предпереходные состояния, фазовые переходы порядок – беспорядок и структурные перестройки в сплаве типа  $\text{Cu}_3\text{Au}$  в зависимости от температуры и состава системы.

<sup>1</sup> Горлов Н.В. Моделирование на ЭВМ плоских дефектов в упорядоченных сплавах типа  $\text{A}_3\text{B}$  и  $\text{A}_3\text{B}(\text{C})$ . Автореф. дис. к.ф.-м.н. – Томск, 1987. – 20 с.