

Определение значений коэффициентов модели пластического деформирования частиц порошка сплава ВТ-22

© 2018 г. **Д.И. Крючков, А.Г. Залазинский, О.В. Романова, А.В. Нестеренко, Е.О. Смирнова**

Институт машиноведения (ИМАШ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Институт металлургии (ИМЕТ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 19.07.17 г., доработана 19.12.17 г., подписана в печать 26.12.17 г.

Предложен расчетно-экспериментальный способ определения модели среды для описания механических свойств частиц порошка из высокопрочного титанового сплава ВТ-22, полученного распылением плазмой в струе инертного газа. Метод основан на косвенном определении диаграммы деформационного упрочнения $\sigma_s \sim \varepsilon$ (зависимость сопротивления деформации от степени пластической деформации). Для натурных испытаний подготовлен образец, представляющий шлиф из залитых в специальную смолу частиц порошка. Приведены результаты вдавливания индентора Виккерса в частицы порошка ВТ-22 и данные компьютерного моделирования этого процесса методом конечных элементов. Среднее значение максимальной глубины индентирования составило $h_{\max} = 6,56$ мкм при наибольшей величине нагружения 2 Н. При компьютерном моделировании для рассматриваемого элемента объема применялась упругопластическая модель материала с нелинейным упрочнением Джонсона–Кука. Для идентификации параметров искомого уравнения предложен алгоритм поиска коэффициентов путем многоступенчатого планирования вычислительного эксперимента. В качестве критериев отбора выбраны оценки максимального совпадения экспериментальных и расчетных данных, в частности по величине максимальной глубины индентирования. В результате исследования из возможной совокупности значений коэффициентов модели материала выбраны наиболее удовлетворяющие условиям поиска. По предложенному алгоритму удалось достичь результата через 4 расчетных цикла. Проведено металлографическое исследование порошка. Установлено, что его частицы имеют грубое внутризеренное строение с преобладанием β -фазы, образованное при плазменном распылении. Вероятно, это привело к снижению сопротивления деформации сплава ВТ-22 в частицах порошка.

Ключевые слова: частицы порошка, титан, метод конечных элементов, индентирование, диаграмма деформационного упрочнения.

Крючков Д.И. – канд. техн. наук, науч. сотрудник лаборатории системного моделирования ИМАШ УрО РАН (620049 г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34). E-mail: kru4koff@bk.ru.

Залазинский А.Г. – докт. техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник лаборатории системного моделирования ИМАШ УрО РАН. E-mail: zalaz@list.ru.

Романова О.В. – инженер лаборатории порошковых, композиционных и наноматериалов ИМЕТ УрО РАН (620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101). E-mail: pridize@mail.ru.

Нестеренко А.В. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории микромеханики материалов ИМАШ УрО РАН. E-mail: nav@imach.uran.ru.

Смирнова Е.О. – канд. техн. наук, науч. сотрудник лаборатории микромеханики материалов ИМАШ УрО РАН. E-mail: evgeniya@imach.uran.ru.

Для цитирования: Крючков Д.И., Залазинский А.Г., Романова О.В., Нестеренко А.В., Смирнова Е.О. Определение значений коэффициентов модели пластического деформирования частиц порошка сплава ВТ-22 // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2018. No. 2. С. 4–12. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-4-12.

Kryuchkov D.I., Zalazinskii A.G., Romanova O.V., Nesterenko A.V., Smirnova E.O.

Determination of parameters for the plasticity model of VT-22 alloy powder particles

A computational and experimental method is proposed to determine the medium model for describing the mechanical properties of powder particles of a high-strength VT-22 titanium alloy obtained by plasma spraying in an inert gas jet. The method is based on the indirect determination of the $\sigma_s \sim \varepsilon$ strain hardening diagram (yield stress dependence on plastic deformation). A specimen for full-scale tests was prepared as a section of powder particles filled into a special resin. The paper provides the results of Vickers indentation into VT-22 powder particles and the results of computer simulation of this process by the finite element method. The average value of the maximum indentation depth was $h_{\max} = 6,56$ μm with a maximum loading value of 2 N. The Johnson-Cook elasto-plastic model of a material with nonlinear hardening was used for the volume element considered during the computer simulation. An algorithm for searching coefficients by computational experiment multistage planning was proposed to identify the parameters

of the equation sought. Estimated maximum coincidences of experimental and calculated data were chosen as selection criteria, in particular, based on maximum indentation depth. As a result of the study, material model coefficient values that meet search conditions best were chosen from a possible set of such values. According to the algorithm proposed, the result was achieved in 4 calculation cycles. Powder metallographic study was carried out. It was found that particles have a coarse intragranular structure with the dominating β phase formed during plasma spraying. This probably led to a decrease in VT-22 alloy deformation resistance in the powder particles.

Keywords: powder particles, titanium, finite element method, indentation, strain hardening diagram.

Kryuchkov D.I. – Cand. Sci. (Tech.), Researcher, Laboratory of system simulation, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IES UB RAS) (620049, Russia, Ekaterinburg, Komsomolskaya str., 34). E-mail: kru4koff@bk.ru.

Zalazinskii A.G. – Dr. Sci. (Tech.), Principal researcher, Laboratory of system simulation, IES UB RAS. E-mail: zalaz@list.ru.

Romanova O.V. – Engineer, Laboratory of powder, composite and nanomaterials, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (620016, Russia, Ekaterinburg, Amundsena str., 101). E-mail: pridlize@mail.ru.

Nesterenko A.V. – Cand. Sci. (Tech.), Senior researcher, Laboratory of material micromechanics, IES UB RAS. E-mail: nav@imach.uran.ru.

Smirnova E.O. – Cand. Sci. (Tech.), Researcher, Laboratory of material micromechanics, IES UB RAS. E-mail: evgeniya@imach.uran.ru.

Citation: Kryuchkov D.I., Zalazinskii A.G., Romanova O.V., Nesterenko A.V., Smirnova E.O. Opredelenie znachenii koefitsientov modeli plasticheskogo deformirovaniya chastits poroshka splava VT-22. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2018. No. 2. P. 4–12. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-4-12.

Введение

Изучение процессов формирования порошковых материалов требует оценки механических характеристик частиц порошка, поскольку каждый процесс их получения накладывает свои особенности на свойства частиц металла. В предлагаемой работе рассматриваются порошки сплава VT-22, полученные из отходов промышленного производства титана. Естественно, что использование таких порошков требует определения их свойств [1].

Исследование механических характеристик частиц порошков представляет определенные трудности ввиду невозможности изготовить стандартизированные образцы и использовать их в традиционных испытаниях, в частности на одноосное растяжение, сжатие, кручение. В связи с этим возникает необходимость использования косвенных методов.

Способ измерения кинетической (инструментированной) твердости с одновременной регистрацией величины нагрузки и глубины вдавливания позволяет рассчитывать комплекс механических свойств материала. Значительный вклад в развитие метода внесли авторы [2–6]. Это стимулировало появление исследований с целью создания методик обработки диаграмм вдавливания инденторов, которые позволили бы получить из них информацию, достаточную для построения диаграмм деформационного упрочнения [7–11]. В ра-

ботах [12–14] представлены способы получения всех участков деформационной кривой путем применения нескольких инденторов с разными углами при вершине.

Неотъемлемой частью исследований по восстановлению диаграмм деформационного упрочнения по данным индентирования становится использование компьютерного моделирования. Авторами [15, 16] осуществлена попытка проверки способов определения пластических свойств металлических материалов методом индентирования с привлечением конечно-элементного моделирования. Сочетание микроиндентирования и конечно-элементного моделирования для установления особенностей при пластическом деформировании материала для частиц порошка изучено в [17]. В работе [18] описан алгоритм поиска параметров кривой упрочнения методом одиночного внедрения острого индентора (Берковича, Виккерса или конического).

В настоящей работе с использованием микроиндентирования деформируемого материала предложен расчетно-экспериментальный метод, позволяющий осуществить параметрическую идентификацию модели частиц порошкового материала. Необходимость такого исследования связана с развитием систем автоматизированного проектирования материалов с использованием концеп-

туальных принципов микро- и мезомеханики [19], в соответствии с которыми можно прогнозировать свойства материала, если они определены на более низких масштабных уровнях. Результаты изучения механических характеристик частиц порошкового материала необходимы для идентификации условия текучести и решения задач его уплотнения.

Материал и методы исследования

Предлагаемый расчетно-экспериментальный метод определения диаграммы деформационного упрочнения $\sigma_s \sim \epsilon$ (зависимость сопротивления деформации от степени пластической деформации) деформируемого материала включает несколько этапов: первый — предусматривает проведение серии испытаний на вдавливание индентора Виккерса и построение диаграммы вдавливания (зависимость нагрузки F от глубины индентирования h); второй — включает компьютерное моделирование процесса индентирования деформируемого тела с принятой моделью среды методом конечных элементов; на заключительном этапе осуществляется отбор коэффициентов принятой модели среды в результате сравнения диаграмм вдавливания, полученных при моделировании и в ходе натурных испытаний.

Объектом исследования были частицы из высокопрочного титанового сплава ВТ-22 состава Ti—5Al—5Mo—5V—1Cr—1Fe, полученных плазменным распылением в струе инертного газа. Они имеют сферическую форму и гладкую поверхность (рис. 1, а). Порошок представлен фракцией менее 440 мкм, средний размер частиц составлял 156 мкм.

Образец для проведения испытаний по экспериментальному определению диаграммы вдавливания был подготовлен следующим образом: частицы порошка заливались специальной смолой на эпоксидной основе, после ее высыхания производилась шлифовка до состояния полусфер на наждачной бумаге № 150, 300, 600 и 800, затем на алмазной пасте № 10, 7, 5, 1 и завершалась обработка на бархате с применением взвеси из оксида хрома. Вид металлографического шлифа приведен на рис. 1, б.

На первом этапе исследования проведена серия вдавливаний в частицы наконечником Виккерса на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН в системе для измерения микротвердости Fisherscope НМ 2000 ХУм. Нагрузка составляла до 2 Н за 20 с и разгрузка — тоже за 20 с. Каждое внедрение индентора осуществлялось в отдельные частицы, расположенные в разных частях образца. Всего проведено 12 вдавливаний.

В рамках используемого метода по определению параметров диаграммы $\sigma_s \sim \epsilon$ выполнена серия моделирующих экспериментов так, чтобы зависимость $F-h$, получаемая при конечно-элементном моделировании, максимально близко приближалась к экспериментальной. При этом использован метод последовательных приближений, графическая интерпретация которого показана на рис. 2.

В первую очередь строился план эксперимента, максимально охватывающий комбинации значений коэффициентов, входящих в искомое уравнение (в настоящей работе — трехпараметрическое). Для матрицы планирования коэффициенты обозначены X_1 , X_2 и X_3 . Число комбинаций из их максимальных и минимальных значений состав-

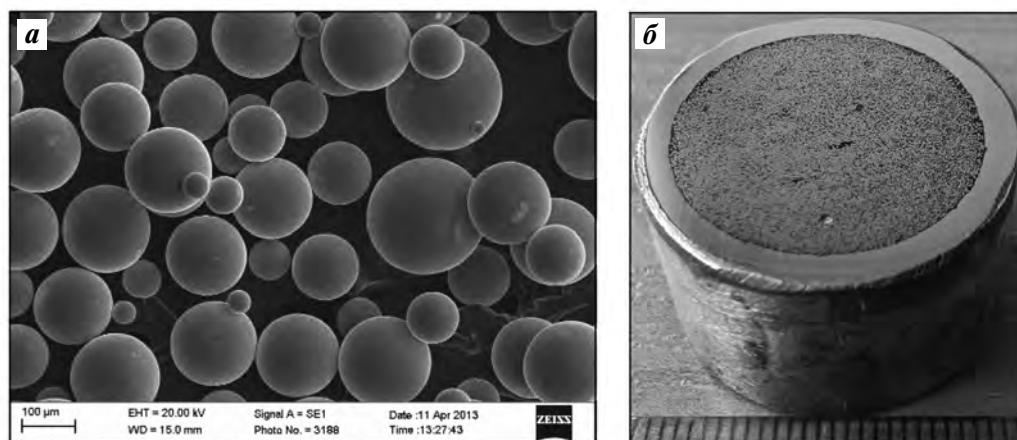


Рис. 1. Порошок сплава ВТ-22 (а) и образец для индентирования его частиц (б)

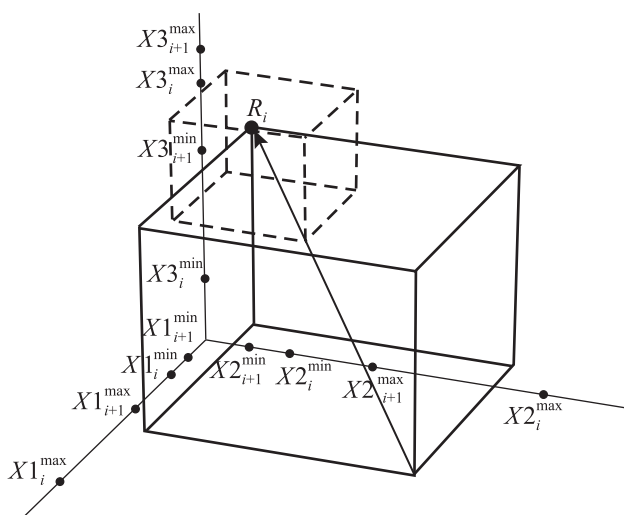


Рис. 2. Графическая интерпретация сужения пространства поиска комбинации значений коэффициентов X_1 , X_2 и X_3

ляло 8, и они образуют параллелепипед в области пространства поиска. После первого приближения производилось сравнение данных, полученных в результате моделирования, с экспериментом. При этом учитывались значения максимальной глубины индентирования ($h_{\max}$). Затем проводился расчет оценки отклонения экспериментальных данных глубины вдавливания индентора от рассчитанных значений в результате компьютерного моделирования по формуле

$$K = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_p |F_i - h_3 |F_i|^2)}, \quad (1)$$

где h_p и h_3 — расчетное и экспериментальное значения глубины проникновения индентора соответ-

ственно; N — количество точек на диаграмме $F(h)$, полученных в процессе вдавливания, для которых определены h_p и h_3 при равных значениях нагрузки F .

После сравнения в первом приближении для комбинации значений с минимальной оценкой (K) строился новый план эксперимента, и все действия повторялись. На рис. 2 показана графическая интерпретация сужения пространства поиска комбинации значений коэффициентов X_1 , X_2 и X_3 . Сплошными линиями обозначена область текущего поиска, штриховыми — область для следующего этапа, которая строится около комбинации значений X_1 , X_2 , X_3 (на рисунке точка R_i), максимально удовлетворяющей условиям поиска.

Поскольку алмазный наконечник Виккерса представляет собой симметричное тело в виде правильной четырехгранной пирамиды, в конечно-элементной модели исследовалась $1/4$ часть индентора и деформируемого тела (рис. 3). Алмазный индентор рассматривался как абсолютно твердое тело. Геометрические размеры деформируемого тела выбирались такими, чтобы пластическая деформация не достигала его границ. Размеры выбранного элемента объема составили $100 \times 100 \times 100$ мкм. Граничные условия задавались в перемещениях. Полагалось, что на контактной поверхности действуют силы трения, подчиняющиеся закону Амонтона—Кулона.

Для рассматриваемого элемента объема применялась упругопластическая модель материала с нелинейным упрочнением. Из перечня моделей САЕ-системы Abaqus была выбрана модель Джонсона—Кука [20], поскольку она представляет

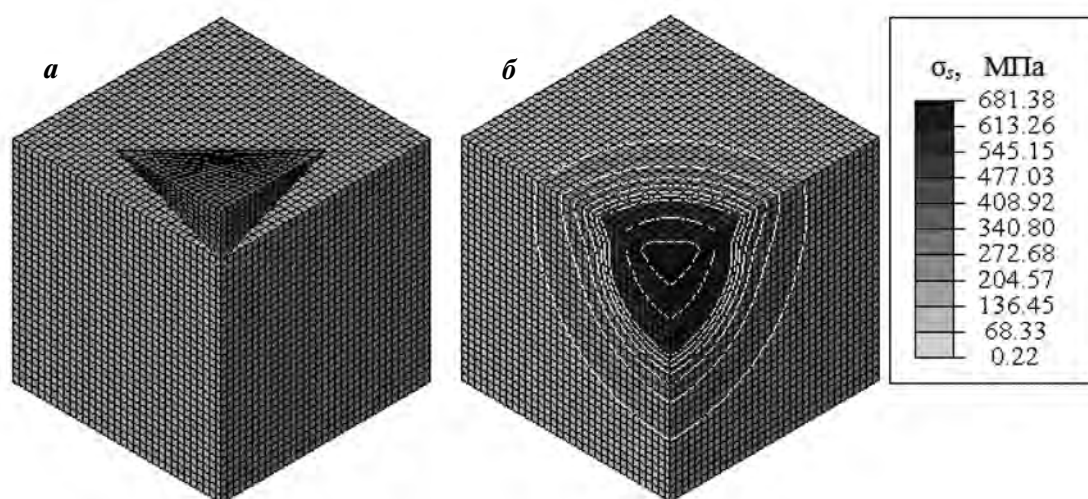


Рис. 3. Конечно-элементная модель (а) и напряженное состояние выбранного элемента объема (б)

собой тип модели в аналитической форме и отражает зависимость упрочнения, а также не требует обязательного использования полной формы, т.е. параметров зависимости скорости деформации. Данная модель удобна для сравнительного исследования при варьировании параметров с использованием метода конечных элементов, в частности для определения свойств титановых сплавов [21].

В работе [21] также приводится методика повторного моделирования процесса вдавливания сферического индентора с систематическим сравнением экспериментальных и прогнозируемых результатов.

В соответствии с моделью связь между интенсивностью напряжений и полной деформацией задается в упругом и пластическом интервалах. В интервале упругой деформации, когда пластические деформации отсутствуют, имеет место линейная упругость.

Известно, что сопротивление металла пластической деформации зависит от типа кристаллической решетки, химического состава и структуры металла, степени накопленной деформации, температурно-скоростных условий деформирования и других параметров. Для описания пластического поведения материала при деформировании материала использовалось уравнение вида [22]

$$\begin{aligned}\sigma_s &= \sigma_s^0(\varepsilon_{pl}, \Theta)R(\dot{\varepsilon}_{pl}), \\ \sigma_s^0 &= [a + b(\varepsilon_{pl})^n](1 - \hat{\Theta}^m).\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь a, b, n, m — параметры модели; ε_{pl} — накопленная интенсивность деформации; $\dot{\varepsilon}_{pl}$ — скорость пластической деформации; $R(\dot{\varepsilon}_{pl})$ — показатель, учитывающий условия скоростного упрочнения (при статических испытаниях принимается $R(\dot{\varepsilon}_{pl}) = 1$); σ_s^0 — предел текучести, определяемый при статических испытаниях (при воздействии на образец постоянно действующей нагрузки со скоростью от 10^{-4} до 10^{-1} с^{-1}); $\hat{\Theta}$ — гомологическая температура:

$$\hat{\Theta} = \begin{cases} 0 & \text{при } \Theta < \Theta_{trans}, \\ \frac{\Theta - \Theta_{melt}}{\Theta_{melt} - \Theta_{trans}} & \text{при } \Theta_{trans} \leq \Theta \leq \Theta_{melt}, \\ 1 & \text{при } \Theta > \Theta_{melt}. \end{cases}$$

где Θ_{trans} — температура перехода, с которой наблюдается температурная зависимость предела текучести, Θ_{melt} — температура плавления.

Поскольку испытания на вдавливание индентора происходят в нормальных условиях, а при

определении твердости использовался статический метод, то $\hat{\Theta} = 0$ и $R(\dot{\varepsilon}_{pl}) = 1$. При холодной деформации влияние степени деформации является определяющим и преобладает над воздействием других факторов, поэтому их влияние принято сводить к изменениям в характере кривых упрочнения, которые они вызывают. Это означает, что для уравнения (2) достаточно определить коэффициенты a, b и n .

Для деформируемого материала приняты значения модуля Юнга $E = 115 \text{ ГПа}$ и коэффициента Пуассона $\nu = 0,34$. Напряженное состояние выделенного элемента объема показано на рис. 3, б.

Результаты и их обсуждение

В результате экспериментального определения зависимости $F-h$ (рис. 4) среднее значение максимальной глубины индентирования составило 6,56 мкм при максимальной нагрузке 2 Н. Расчетная диаграмма $F-h$ строилась по данным компьютерного моделирования. Последовательно изменяя коэффициенты уравнения (2), аппроксимирующего кривую упрочнения $\sigma_s \sim \varepsilon$, в соответствии с выбранным планом эксперимента осуществлялось приближение расчетной диаграммы $F-h$ к экспериментальной.

При планировании серии численных экспериментов использовались данные литературы о свойствах стандартных образцов из сплава ВТ-22 после различной термообработки. В матрице планирования вычислительного эксперимента максимальное и минимальное значения варьируемых факторов составляли +1 и -1. В первом приближении

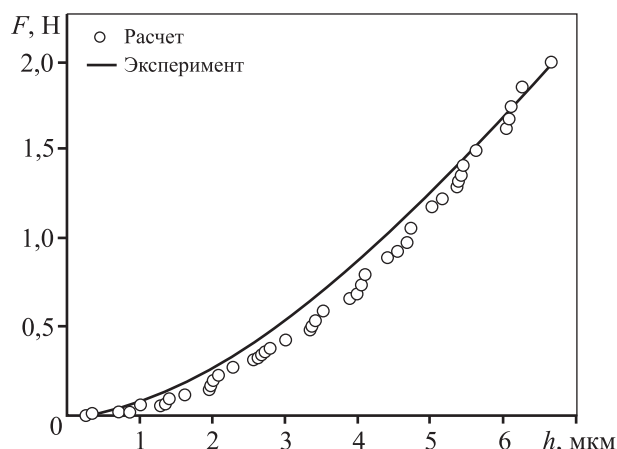


Рис. 4. Экспериментальная и расчетная диаграммы вдавливания

План расчетного эксперимента

i	№ опыта	$X1$	a , МПа	$X2$	b , МПа	$X3$	n	$h_{\max}$, мкм	K
1	1	+1	845	+1	630	+1	0,2	4,89	0,7965
	2	-1	420	+1	630	+1	0,2	5,85	0,2815
	3	+1	845	-1	320	+1	0,2	5,19	0,5609
	4	-1	420	-1	320	+1	0,2	6,22	0,2097
	5	+1	845	+1	630	-1	0,08	4,74	0,8352
	6	-1	420	+1	630	-1	0,08	5,97	0,2678
	7	+1	845	-1	320	-1	0,08	4,98	0,6543
	8	-1	420	-1	320	-1	0,08	6,0	0,2546
4	25	+1	530	+1	200	+1	0,65	6,46	0,3982
	26	-1	500	+1	200	+1	0,65	6,61	0,4294
	27	+1	530	-1	180	+1	0,65	6,53	0,299
	28	-1	500	-1	180	+1	0,65	6,62	0,4136
	29	+1	530	+1	200	-1	0,5	6,22	0,5261
	30	-1	500	+1	200	-1	0,5	6,34	0,4341
	31	+1	530	-1	180	-1	0,5	6,44	0,4079
	32	-1	500	-1	180	-1	0,5	6,6	0,4118

числовые коэффициенты уравнения (2) приняты следующими: $a_{\max} = 845$ МПа, $a_{\min} = 420$ МПа, $b_{\max} = 630$ МПа, $b_{\min} = 320$ МПа, $n_{\max} = 0,2$, $n_{\min} = 0,08$. В таблице представлены коэффициенты для уравнения (2) в первом приближении (опыты 1–8) и последнем (25–32). Для проведения моделирования значения коэффициентов для уравнения (2) брали в соответствии с данными таблицы.

В результате достижение минимума оценки отклонения K и максимального совпадения по величине $h_{\max}$ удалось достичь через 4 цикла. Коэффициенты a , b и n составили 530 МПа, 180 МПа и 0,65 соответственно. На рис. 5 представлена кривая упрочнения для найденных коэффициентов уравнения (2). Коэффициент a характеризует начальный предел текучести, b и n — интенсивность упрочнения по мере развития пластической деформации. С уменьшением каждого из значений a и b и ростом показателя n наблюдается увеличение глубины вдавливания. При малых степенях деформации ($\varepsilon_{pl} < 1$) повышение n означает, что по мере развития пластической деформации интенсивность упрочнения (размерность этой величины Н/мм²) исследованного материала снижается.

Для сопоставления результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными

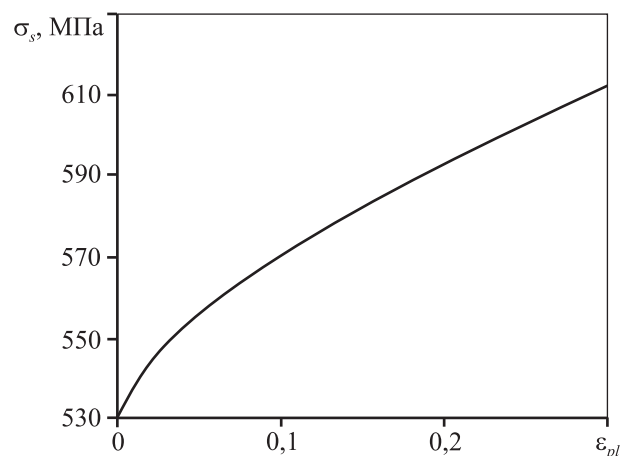


Рис. 5. Кривая упрочнения для найденных коэффициентов уравнения (2)

были измерены размеры отпечатка. Результаты представлены на рис. 6. Длина половины диагонали отпечатка, полученного при натурном эксперименте, составила 17,3 мкм, а при моделировании — 17,5 мкм.

Природа α/β -сплава такова, что термическая обработка может кардинально изменить его микроструктуру [23, 24]. С целью объяснения прочностных характеристик материала гранул, определенных по результатам индентирования, по

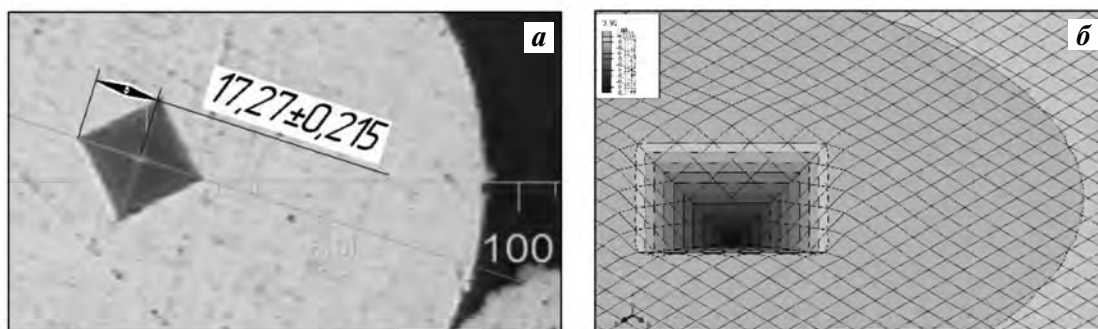


Рис. 6. Размеры отпечатка, полученного экспериментально (а) и при моделировании (б)

сравнению со свойствами массивных (стандартных) образцов из сплава ВТ-22 было проведено металлографическое исследование с использованием микроскопа Olympus GX-51 (ЦКП «Урал-М», ИМЕТ УрО РАН). Выявлено, что микроструктура материала гранул характерна для литого состояния.

Невысокие значения полученных коэффициентов a и b , в частности начального предела текучести, вероятно, можно объяснить особенностями микроструктуры, образовавшейся в результате плазменного распыления. Как отмечают авторы [25], нагрев титанового сплава до температуры полиморфного превращения $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ сопровождается значительным повышением пластичности и снижением сопротивления деформации.

Заключение

На основе испытаний по внедрению индентора Виккерса в исследуемый материал и компьютерного моделирования этого процесса предложен расчетно-экспериментальный метод определения коэффициентов упрочнения в функциональной зависимости сопротивления деформации от степени пластической деформации для частиц металлического порошка.

Метод позволил с достаточной точностью определить коэффициенты уравнения (2), описывающего кривую упрочнения сплава ВТ-22, полученного плазменным распылением в струе инертного газа из отходов промышленного производства титана.

Работа выполнена в рамках программы ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 годы по теме 0391-2016-0002 (№ гос. регистрации АААА-А18-118020790145-0) с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия, 1980.
2. Алехин В.П., Булычев С.И. Расчет механических характеристик при испытании на вдавливание с учетом упругих деформаций // Физика и химия обработки материалов. 1978. No. 3. С. 134–138.
3. Bulychov S.I., Alekhin V.P. Method of kinetic hardness and microhardness in testing impression by an indenter // Industrial Laboratory. 1988. Vol. 53. No. 11. P. 1091–1096.
4. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990.
5. Булычев С.И. О корреляции диаграмм вдавливания и растяжения // Зав. лаборатория. 2001. Т. 67. No. 11. С. 33–41.
6. Булычев С.И., Кравченко А.Н. Новые параметры подобия при переходе от диаграмм вдавливания к диаграммам растяжения // Зав. лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. No. 2. С. 49–54.
7. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: Современные зарубежные методики. М.: Физический факультет МГУ, 2004.
8. Федосов С.А. Индентирование материалов // Наноинженерия. 2014. No. 10 (40). С. 35–48.
9. Смирнов С.В., Смирнов В.К., Солошенко А.Н., Швейкин В.П. Определение сопротивления деформации по результатам внедрения конического индентора // Кузн.-штамп. пр-во. 2000. No. 3. С. 3–6.
10. Коновалов Д.А., Смирнов С.В., Коновалов А.В. Определение кривых деформационного упрочнения металлов по результатам вдавливания конических инденторов // Дефектоскопия. 2008. No. 12. С. 55–63.
11. Смирнова Е.О. Определение диаграмм деформационного упрочнения поверхностных слоев метал-

- лических материалов по результатам испытаний на вдавливание и царапание индентора Берковича // Мезо-, нано-, биомеханика и механика природных процессов: Вестник НГУ им. Н.И. Лобачевского. 2011. No. 4 (2). С. 533—534.
12. *Vasauskas C.S., Жидонис В.Ю.* Диаграмма твердости и ее применение для определения характеристики прочности металлов // Зав. лаборатория. 1962. No. 5. С. 605—608.
 13. *Atkins A.G., Tabor D.* Plastic indentation in metals with cones // J. Mech. Phys. Solids. 1965. No. 13. P. 149—164.
 14. *Cheng Y.-T., Li Z.* Hardness obtained from conical indentation with various cone angles // J. Mater. Res. 2000. Vol. 15. No. 12. P. 2830—2835.
 15. *Bucaille J.L., Stauss S., Felder E., Michler J.* Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters // Acta Mater. 2003. Vol. 51. P. 1663—1678.
 16. *Dean J., Clyne T.W.* Extraction of plasticity parameters from a single test using a spherical indenter and FEM modelling // Mechanics of Materials. 2017. Vol. 105. P. 112—122. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.11.014.
 17. *Olsson E., Larsson P.-L.* A numerical analysis of cold powder compaction based on micromechanical experiments // Powder Technology. 2013. No. 243. P. 71—78. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.03.040.
 18. *Dao M., Chollacoop N., Van Vliet K.J., Venkatesh T.A., Suresh S.* Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation // Acta Mater. 2001. Vol. 49. P. 3899—3918.
 19. *Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В.* Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. 1. Физические основы многоуровневого подхода // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. No. 3. С. 9—22.
 20. *Abaqus/CAE User's Manual (Version 6.10)* Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 2009.
 21. *Wang F., Zhao J., Zhu N., Li Z.* A comparative study on Johnson—Cook constitutive modeling for Ti—6Al—4V alloy using automated ball indentation (ABI) technique // J. Alloys and Compd. 2015. Vol. 633. No. 5. P. 220—228. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.284.
 22. *Johnson G.R., Cook W.H.* Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Eng. Fract. Mech. 1985. Vol. 21. No. 1. P. 31—48.
 23. *Fujii H.* Strengthening of alpha+beta titanium alloys by thermomechanical processing // Mater. Sci. Eng. A. 1998. Vol. 243. No. 1. P. 103—108.
 24. *Birta A.M., Champagne Jr. V.K., Sisson Jr. R.D., Apelian D.* Microstructural analysis of Ti—6Al—4V powder for cold gas dynamic spray applications // Adv. Powder Technol. 2015. Vol. 26. No. 5. P. 1335—1347.
 25. *Илларионов А.Г., Попов А.А.* Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: Учеб. пос. Екатеринбург: УрФУ, 2014.

References

1. *Kiparisov S.S., Libenson G.A.* Poroshkovaja metallurgija [Powder metallurgy]. Moscow: Metallurgija, 1980.
2. *Alekhin V.P., Bulychev S.I.* Raschet mekhanicheskikh kharakteristik pri ispytanii na vдавlivaniye s uchedom uprugikh deformatsiy [Calculation of mechanical characteristics in the test for indentation with allowance for elastic deformations]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 1978. No. 3. P. 134—138.
3. *Bulychev S.I., Alekhin V.P.* Method of kinetic hardness and microhardness in testing impression by an indenter. *Industrial Laboratory*. 1988. Vol. 53. No. 11. P. 1091—1096.
4. *Bulychev S.I., Alekhin V.P.* Ispytaniye materialov neprevyym vдавlivaniyem indentora [Testing of materials by depression]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990.
5. *Bulychev S.I.* O korrelyatsii diagramm vдавlivaniya i rastyazheniya [On the correlation of the indentation and extension diagrams]. *Zavodskaya laboratoriya*. 2001. Vol. 67. No. 11. P. 33—41.
6. *Bulychev S.I., Kravchenkov A.N.* Novyye parametry podobiya pri perekhode ot diagramm vдавlivaniya k diagrammam rastyazheniya [New similarity parameters in transition from indentation diagrams to tensile diagrams]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2014. Vol. 80. No. 2. P. 49—54.
7. *Fedosov S.A., Peshek L.* Opredelenie mekhanicheskikh svojstv materialov mikroindentirovaniem: Sovremennyye zarubezhnyye metodiki [Determining mechanical properties of materials by microindentation: Modern foreign methods]. Moscow: Faculty of Physics of MSU, 2004.
8. *Fedosov S.A.* Indentirovanie materialov [The indentation of materials]. *Nanoinzheneriya*. 2014. No. 10 (40). P. 35—48.
9. *Smirnov S.V., Smirnov V.K., Soloshenko A.N., Shvejkin V.P.* Opredelenie soprotivleniya deformatsii po rezul'tatam vnedreniya konicheskogo indentora [Determination of the yield stress on the results of the penetration of the conical indenter]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo*. 2000. No. 3. P. 3—6.
10. *Konovalov D.A., Smirnov S.V., Konovalov A.V.* Determination of metal strain-hardening curves from conical-indenter impression results. *Russ. J. Nondestructive Testing*. 2008. Vol. 44. No. 12. P. 847—853.
11. *Smirnova E.O.* Opredelenie diagramm deformatsionnogo uprochneniya poverhnostnykh slojov metallicheskih mate-

- rialov po rezul'tatam ispytanij na vдавливание i carapanie indentora Berkovicha [Determination of strain hardening diagrams of metallic materials surface layers based on the results of the indentation tests and the tests for the Berkovich indenter scratching]. In: *Mezo-, nano-, biomehanika i mehanika prirodnih processov: Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2011. No. 4 (2). P. 533—534.
12. Vasauskas S.S., Zhidonis V.Ju. Diagramma tverdosti i ee primenenie dlja opredelenija harakteristiki prochnosti metallov [The hardness diagram and its application for determining the strength characteristics of metals]. *Zavodskaja laboratorija*. 1962. No. 5. P. 605—608.
 13. Atkins A.G., Tabor D. Plastic indentation in metals with cones. *J. Mech. Phys. Solids*. 1965. No. 13. P. 149—164.
 14. Cheng Y.-T., Li Z. Hardness obtained from conical indentation with various cone angles. *J. Mater. Res.* 2000. Vol. 15. No. 12. P. 2830—2835.
 15. Bucaille J.L., Stauss S., Felder E., Michler J. Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters. *Acta Mater.* 2003. Vol. 51. P. 1663—1678.
 16. Dean J., Clyne T.W. Extraction of plasticity parameters from a single test using a spherical indenter and FEM modeling. *Mechanics of Materials*. 2017. Vol. 105. P. 112—122. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.11.014.
 17. Olsson E., Larsson P.-L. A numerical analysis of cold powder compaction based on micromechanical experiments. *Powder Technology*. 2013. No. 243. P. 71—78. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.03.040.
 18. Dao M., Chollacoop N., Van Vliet K.J., Venkatesh T.A., Suresh S. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation. *Acta Mater.* 2001. Vol. 49. P. 3899—3918.
 19. Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V. Fizicheskaja mezomehanika deformiruемого tvjordogo tela kak mnogourovnevoj sistemy. 1. Fizicheskie osnovy mnogourovneвого podhoda [Physical mesomechanics of a deformed solid as a multilevel system. I. Physical fundamentals of the multilevel approach]. *Fizicheskaja mezomehanika*. 2006. Vol. 9. No. 3. P. 9—22.
 20. Abaqus/CAE User's Manual (Version 6.10) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 2009
 21. Wang F., Zhao J., Zhu N., Li Z. A comparative study on Johnson—Cook constitutive modeling for Ti—6Al—4V alloy using automated ball indentation (ABI) technique. *J. Alloys and Compnd.* 2015. Vol. 633. No. 5. P. 220—228. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.284.
 22. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Eng. Fract. Mech.* 1985. Vol. 21. No. 1. P. 31—48.
 23. Fujii H. Strengthening of alpha+beta titanium alloys by thermomechanical processing. *Mater. Sci. Eng. A*. 1998. Vol. 243. No. 1. P. 103—108.
 24. Birta A.M., Champagne Jr. V.K., Sisson Jr. R.D., Apelian D. Microstructural analysis of Ti—6Al—4V powder for cold gas dynamic spray applications. *Adv. Powder Technol.* 2015. Vol. 26. No. 5. P. 1335—1347.
 25. Illarionov A.G., Popov A.A. Tehnologicheskie i jekspluatacionnye svojstva titanovyh splavov: uchebnoe posobie [Technological and exploitation properties of titanium alloys: educational material]. Ekaterinburg: UrFU, 2014.