

УДК 621.762

А.И. Рудской, Ю.А. Соколов

**ИССЛЕДОВАНИЕ
С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS WORKBENCH
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЧАСТИЦЫ
ПРИ УДАРЕ О СТЕНКУ КАМЕРЫ**

A.I. Rudskoj, Yu.A. Sokolov

**ON RESEARCHING
THE PARTICLE TENSION ON IMPACT WITH CAMERA WALL
BY USING ANSYS WORKBENCH PROGRAM COMPLEX**

Исследовано напряженно-деформированное состояние частицы и стенки камеры в области их взаимодействия в процессе получения гранул методом PREP. Критерием является допустимый порог упруго-пластической деформации, обеспечивающий заданное качество гранул. Показано, что моделирование напряженно-деформированного состояния частицы и стенки камеры в области их взаимодействия является эффективным инструментом для исследования процесса получения гранул методом PREP. Предлагаемый подход позволяет прогнозировать качество гранул. Разработанная математическая модель имеет прикладное значение. Модель позволяет рассчитывать режимы процесса при получении гранул из тугоплавких металлов и сплавов, интерметаллидов и др. С помощью современного программного комплекса ANSYS выполнено исследование процесса столкновения частицы из титана со стальной стенкой.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ГРАНУЛЫ; МЕТОД PREP; НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ; ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ.

The article draws on the intense deformed condition of a particle and camera wall within their interaction in the course of receiving granules by the PREP method. The criterion is an admitted threshold of elastic plastic deformation providing the set quality of granules. It is shown that modeling of the intense deformed condition of the particle and camera wall within their interaction is the effective tool for the research of a process of receiving granules by PREP method. The approach suggested allows to predict quality of granules. The developed mathematical model has an applied value. The model allows to calculate the process modes when receiving granules from refractory metals and alloys, intermetallid, etc. It is executed the research of a process of collision of the titan-made particle with a steel wall by using the modern program ANSYS complex.

MATHEMATICAL MODELING; GRANULES; METHOD PREP; INTENSE-DEFORMED CONDITION; POWDER METALLURGY.

Для изготовления ответственных деталей различного назначения широко используются технологии порошковой металлургии [1–4], в том числе в сочетании с технологиями лазер-

ной и электронно-лучевой обработки материалов [5–7]. Одной из наиболее перспективных является технология синтеза изделий с помощью электронного луча (СИЭЛ) [8–10]. Для ее про-

мышленной реализации важное значение имеет процесс получения исходных гранул различных материалов. В связи с этим актуальна задача исследования деформации частицы вследствие ее взаимодействия со стенкой камеры. Решение этой задачи предоставляет новые возможности для управления процессом получения гранул методом вращающегося электрода с плазменным нагревом (PREP).

Процесс получения гранул жаропрочных и титановых сплавов методом PREP показан на рис. 1. Вращающийся электрод подается в камеру распыления, где в результате оплавления плазменной дугой на торце электрода образуется жидкая пленка металла толщиной в несколько раз меньше диаметра образующихся гранул. Отделение частицы от электрода происходит с торцевого жидкого венца, диаметр которого больше диаметра электрода [11, 12]. Частицы расплава, оторвавшись от венца вращающейся заготовки, перемещаясь в газовой среде, охлаждаются и сталкиваются со стенкой камеры распыления.

Для более интенсивного отвода тепла от частицы, помимо охлаждения излучением, целесообразно использовать конвективное охлаждение в потоке смеси инертных газов (аргон и гелий). В процессе охлаждения частицы теплоотдача путем принудительной конвекции примерно на порядок превосходит потери тепла за счет излучения. В этом случае длина полета частицы, регулируемая скоростью подачи и составом газовой смеси в камере распыления, существенно уменьшается.

Важнейшими параметрами, влияющими на скорость охлаждения частицы, являются размер частицы, разность температур между частицей и газом, теплофизические свойства газа и материала частицы.

Целью нашего исследования является определение напряженно-деформированного состояния частицы и стенки камеры в области их взаимодействия при использовании метода PREP. Сложность задачи обусловлена динамикой процесса, включающего в себя контактирование частицы со стенкой, а также пластическую деформацию.

Методика моделирования и характерные особенности модели

В общем случае частица в момент удара о стенку камеры может иметь значения скорости и температуры, при которых происходит пластическая деформация, превышающая предельно допустимую, что отрицательно отражается на качестве. Критерием оценки допустимой скорости полета частицы служит допустимый порог упруго-пластической деформации, обеспечивающий заданное качество гранул. К основным параметрам, определяющим скорость полета и температуру частиц, можно отнести размеры рабочей камеры распыления и состав газовой среды.

Экспериментальные данные, полученные при исследовании геометрии частиц и стенки камеры, не всегда позволяют получить полную информацию о протяженности упругой и пластической

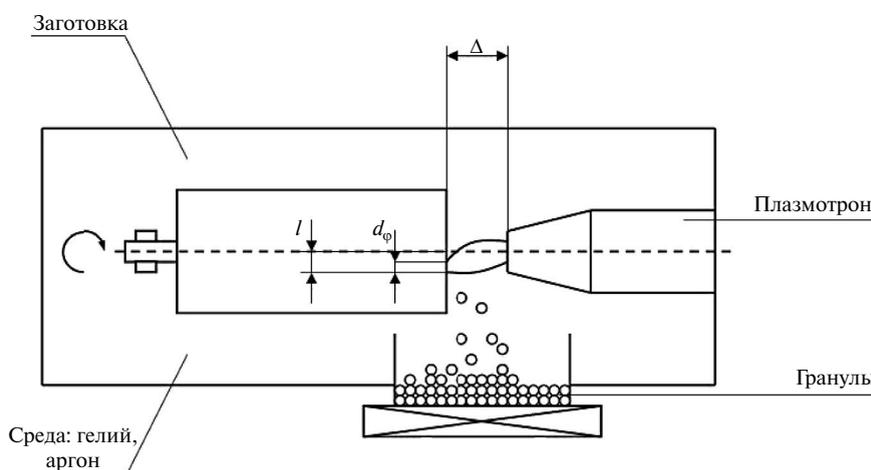


Рис. 1. Получение гранул жаропрочных и титановых сплавов методом вращающейся заготовки (PREP)

зон, о характере распределения контактных напряжений на поверхности частицы.

При исследовании была рассмотрена модель частицы, представленная на рис. 2 (а — до удара частицы о стенку, б — после удара). Рассмотрим наиболее критичный случай — прямой центральный удар частицы сферической формы о стенку. Во время удара частица и стенка деформируются (фаза деформации). Далее частица в зависимости от температуры и скорости полета может полностью или частично восстановить свою геометрическую форму (фаза восстановления). Эта задача — нестационарная. Особо следует отметить шероховатость поверхности частицы и стенки, обеспечивающей нормальный контакт.

Уравнение энергии для рассматриваемого удара частицы о стенку можно представить в следующем виде:

$$m_q V_1^2 / 2 = m_q V_2^2 / 2 = E_{\text{пласт}}, \quad (1)$$

где V_1 — скорость частицы до удара о стенку; V_2 — скорость частицы после удара о стенку; m_q — масса частицы; $E_{\text{пласт}}$ — энергия пластической деформации.

Запишем формулу для определения ударного импульса:

$$P(t) = \int_0^{t_1} F(t) dt, \quad (2)$$

где $P(t)$ — ударный импульс, $F(t)$ — сила удара, t_1 — время удара.

Формула для расчета импульса во время удара имеет следующий вид:

$$P = m_q V_1. \quad (3)$$

Используя формулу (2), можно выразить импульс через силу и время удара:

$$P(t) = \int_0^{t_1} F(t) dt = F_{\text{ср}} t_1, \quad (4)$$

где $F_{\text{ср}}$ — средняя сила удара.

Отсюда для фазы деформации следует

$$F_{\text{ср}} t_1 = m_q V_1. \quad (5)$$

Процесс столкновения можно описать следующей схемой. При ударе частицы о стенку в ней возникают упругие деформации, которые, развиваясь, могут переходить в пластические деформации. В материалах частицы и стенки камеры возникает сложнапряженное состояние.

Успешное решение прикладных задач получения гранул методом PREP металлов во многом зависит от понимания физической сущности явлений, сопровождающих процесс.

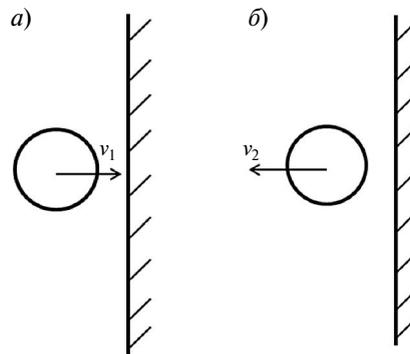


Рис. 2. Расчетная схема модели (схема соударения частицы с неподвижной стенкой)

В качестве инструмента моделирования выбран программный комплекс ANSYS Workbench [13]; пространственный режим — осесимметричная задача; тип расчета — динамический; скорость полета частицы задается.

Построение математической модели процесса

Геометрическое представление модели. Рассматривается процесс столкновения частицы сферической формы, летящей со скоростью V , массой m_q . Диаметр частицы составляет 100 мкм. Материал частицы — титан. Материал стенки камеры — сталь, обладающая следующими характеристиками: предел текучести — $2,5 \cdot 10^8$ Па; плотность — 7850 кг/м^3 ; коэффициент линейного расширения стали — $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; начальная температура — $40 \text{ } ^\circ\text{C}$; модуль упругости — $2 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона — 0,3; модуль объемной упругости — $1,6667 \cdot 10^{11}$ Па; модуль сдвига — $7,6923 \cdot 10^{10}$ Па.

Поскольку оторвавшаяся от венца заготовки (электрода) частица имеет температуру близкую к температуре плавления и во время полета охлаждается, при расчете необходимо учитывать зависимость модуля упругости E материала частицы от температуры. Для титана принимаем линейную зависимость, представленную на рис. 3, причем $E(T_{\text{liq}}) = 0$ (T_{liq} — температура ликвидус).

В общем виде предел прочности материала можно представить следующей функциональной зависимостью:

$$\sigma_T = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T), \quad (6)$$

где σ_T — предел текучести, ε — деформация, $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформации, T — температура.

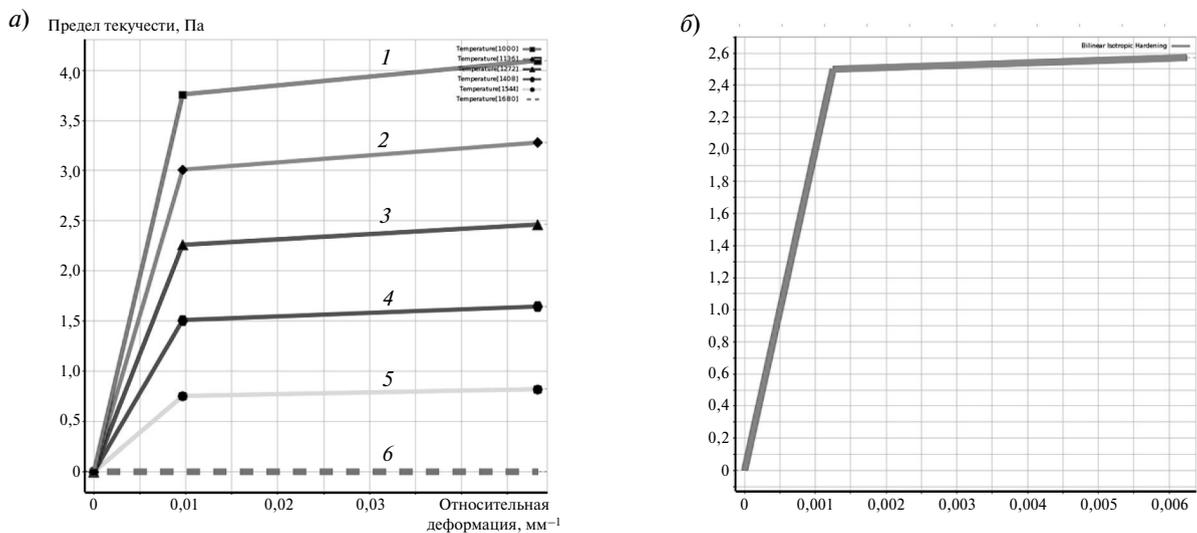


Рис. 4. Зависимость предела текучести титана (а) и стали (б) от относительной деформации при различных температурах:
1 — ; 2 — ; 3 — ; 4 — ; 5 —

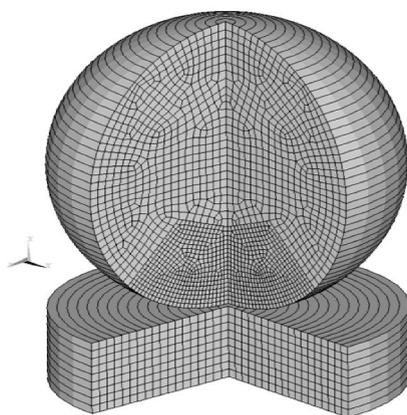


Рис. 5. Твердотельная сетка модели

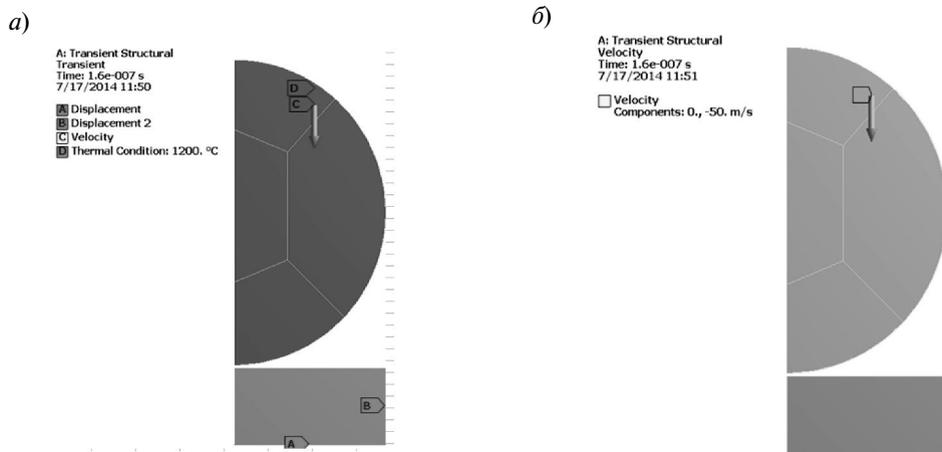


Рис. 6. Граничные условия

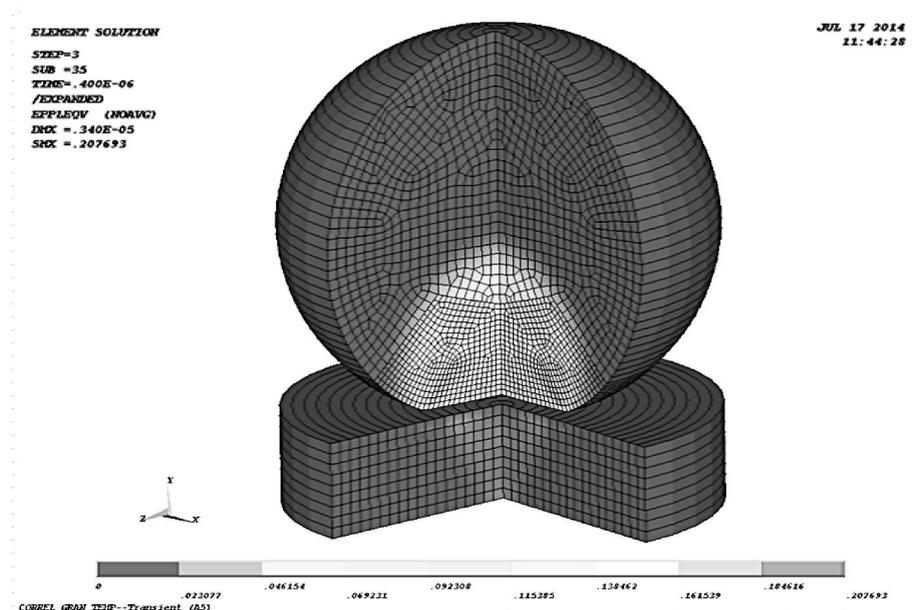


Рис. 7. Распределение пластических деформаций в частице после столкновения частицы со стенкой

Температуру стенки в момент удара принимаем равной $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты расчетных исследований. При ударе частицы о стенку в ее материале возникают значительные пластические деформации (рис. 7), величина которых зависит от температуры и скорости частицы в момент ее столкновения со стенкой камеры.

Общая (остаточная) деформация частицы после удара представлена на рис. 8.

За критерий деформации частицы принимаем отношение ее вертикального размера до и после деформации:

$$k = h_1/h_2, \quad (11)$$

где h_1 , h_2 — вертикальный размер частицы соответственно после и до деформации.

Формула для расчета коэффициента деформации частицы в процентах имеет следующий вид:

$$k [\%] = \text{abs}(\Delta_1 - \Delta_2) 100/d_{\text{ч}}, \quad (12)$$

где Δ_1 , Δ_2 — деформация соответственно в верхней и в нижней областях частицы; $d_{\text{ч}}$ — диаметр частицы.

На рис. 9 представлены графические зависимости коэффициента деформации k от скорости полета частицы (а) и от температуры (б): 1 — линейная зависимость, 2 — квадратичная.

На рис. 10 показана диаграмма влияния двух параметров (скорость и температура частицы) на коэффициент деформации. Результаты расчета показывают, что наиболее сильное влияние на деформацию частицы оказывает ее температура (на рисунке выделена желтым цветом), в гораздо меньшей степени — скорость полета (красный цвет). Следовательно, наиболее важной характеристикой является температура частицы. Во время полета частицы необходимо обеспечить

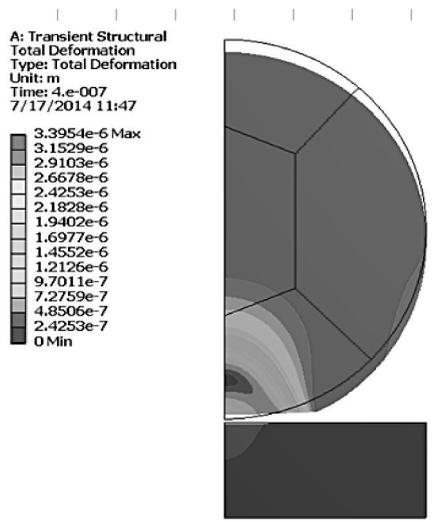


Рис. 8. Общая деформация частицы после столкновения со стенкой

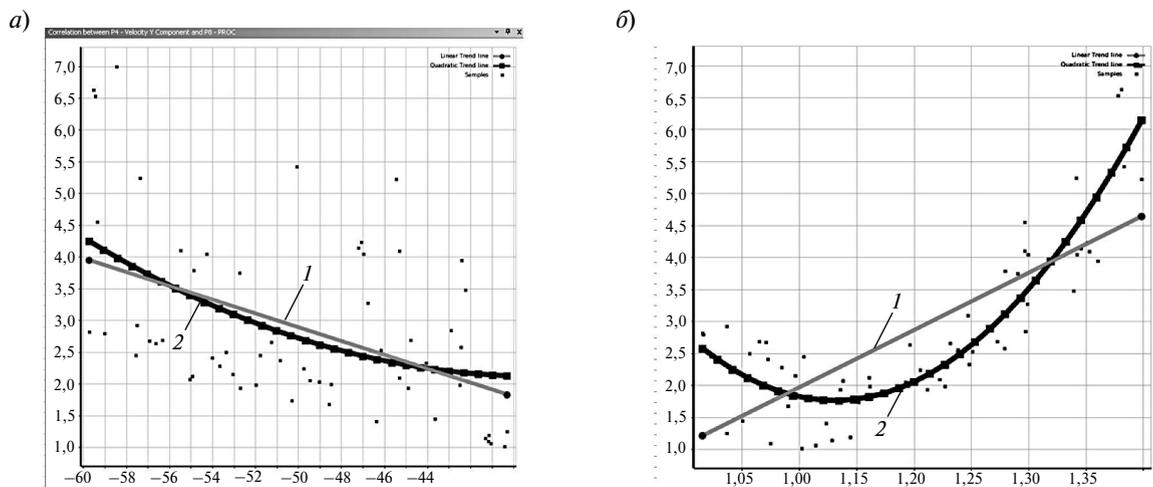


Рис. 9. Графическая зависимость коэффициента деформации k от скорости полета частицы (а) и температуры (б)

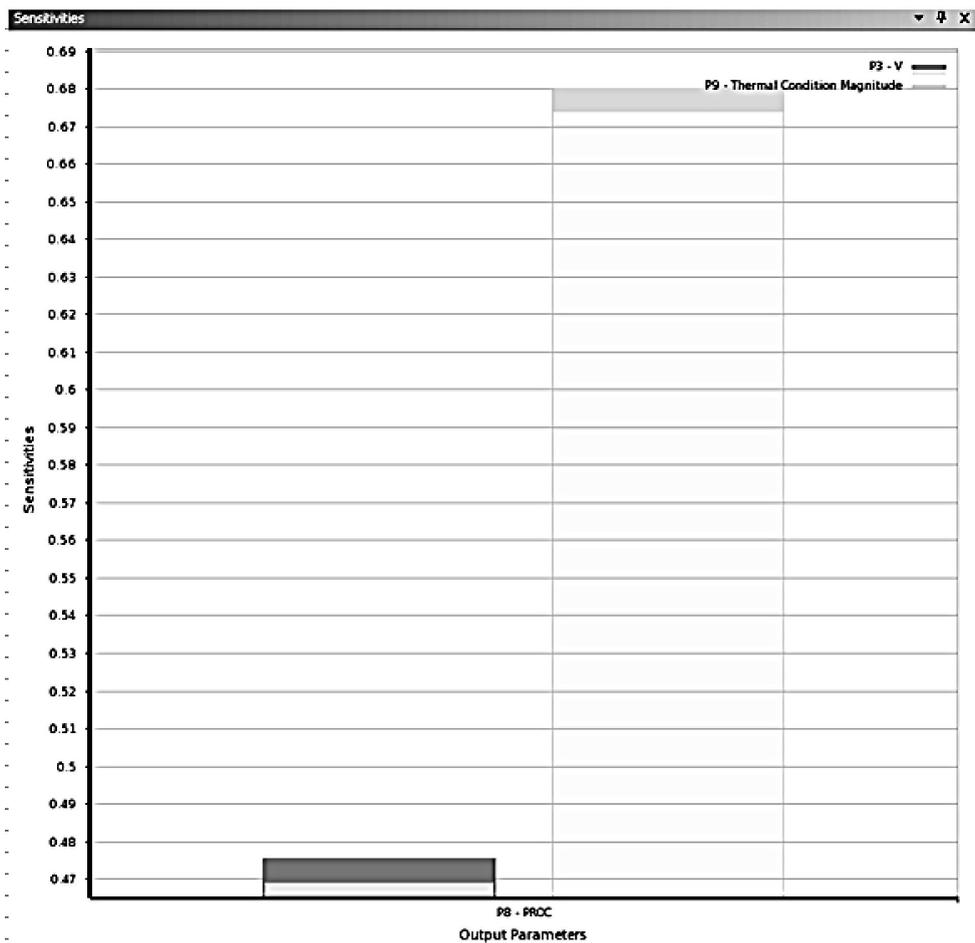


Рис. 10. Диаграмма влияния скорости полета частицы и температуры на степень деформации

надежное охлаждение с целью максимально возможного снижения температуры частицы до ее встречи со стенкой.

После завершения процедуры заполнения исследуемого пространства возможных решений пробными точками ANSYS Workbench переходим к построению поверхности отклика. Определена поверхность отклика деформаций частицы на изменение температуры и скорости полета после удара со стенкой (рис. 11).

Полученные результаты расчета позволяют перейти к определению области (V_i, T_i), в которой значения деформаций ниже заданного допустимого уровня (рис. 12).

Моделирование напряженно-деформированного состояния частицы и стенки камеры в области их взаимодействия — эффективный

инструмент для исследования процесса получения гранул методом PREP, позволяющий прогнозировать качество гранул.

Разработанная математическая модель имеет прикладное значение, так как:

позволяет рассчитать режимы процесса при получении гранул из тугоплавких металлов и сплавов, интерметаллидов и др.;

определяет область значений параметров «скорость полета — температура частицы», обеспечивающую получение качественных гранул;

учитывает зависимость модуля упругости и предела текучести материала частицы от температуры.

Выполнено исследование процесса столкновения частицы из титана со стальной стенкой с помощью современного программного комплекса ANSYS, в результате которого:

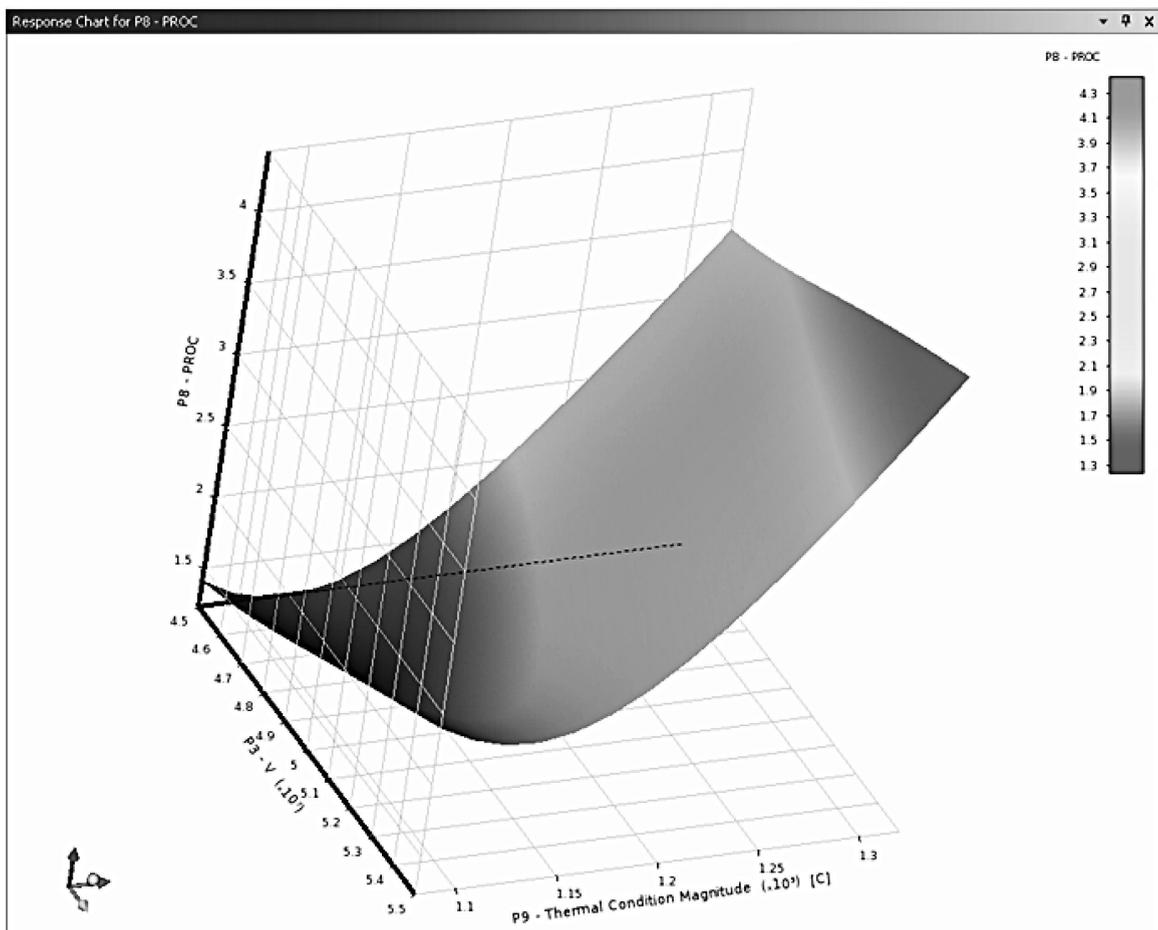


Рис. 11. Поверхности отклика остаточных (пластических) деформаций частицы на изменение температуры и скорости полета частицы



Рис. 12. Области (V_i, T_i) , в которой значения деформаций ниже заданного допустимого уровня (1 — V_4 ; 2 — V_3 ; 3 — V_5)

получено распределение пластических деформаций в частице после столкновения со стенкой; определено, что наиболее сильное влияние на деформацию частицы оказывает ее температура (по сравнению со скоростью полета); рассчитана область допустимых значений в двумерном пространстве параметров «тем-

пература частицы — скорость полета», в которой величины деформаций являются приемлемыми.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации по программе поддержки ведущих научных школ РФ, грант № НШ-6413.2014.8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокорин В.Н., Рудской А.И., Филимонов В.И., Бульжев Е.М., Кондратьев С.Ю. Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
2. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А. Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 3 (178). С. 148–155.
3. Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В. Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
4. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.
5. Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // Welding International. August 2012. Vol. 26, № 8. P. 629–632.
6. Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О. Оптимизация параметров поверхностно-упрочнен-

- ного слоя при лазерной закалке деталей // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.
7. Кондратьев С.Ю., Попов В.О. Получение износостойкого квазинаноструктурного поверхностного слоя в сталях и цветных сплавах лазерной обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 2. С. 22–28.
8. Murr L.E., Gaytan S.M., Ceylan A., Martinez E., Martinez J.L., Hernandez D.H., Machado B.I., Ramirez D.A., Medina F., Collins S., Wicker R.B. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting // Acta Materialia. 2010. № 58. P. 1887–1894.
9. Biamino S., Penna A.U., Ackelid U., Sabbadini S., Tassa O., Fino P., Pavese M.P., Gennaro P., Badini C. Electron beam melting of Ti48Al2Cr2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation // Intermetallics. 2011. № 19. P. 776 781.
10. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.
11. Мусиенко В.Т. Особенности распыления вращающейся заготовки // В кн. Металлургия гранул. М.: ВИЛС, 1986. Вып. 3. С. 23–33.
12. Мусиенко В.Т. Закономерности образования гранул при центробежном распылении вращающейся заготовки // В кн.: Металлургия гранул. М.: ВИЛС,

1983. Вып. 1. С. 41–48.

13. ANSYS Basic Analysis Procedures Guide. ANSYS Realise 5.6 / ANSYS Inc, 1998.

14. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

REFERENCES

1. Kokorin V.N., Rudskoi A.I., Filimonov V.I., Bulzhev Ye.M., Kondratiev S.Yu. Teoriya i praktika protsessa pressovaniya geterofaznykh uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesey na osnove zheleza. Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU, 2012. 236 s. (rus.)
2. Rudskoi A.I., Kondratiev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A. Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 3 (178). S. 148–155. (rus.)
3. Rudskoi A.I., Kokorin V.N., Kondratiev S.Yu., Filimonov V.I., Kokorin A.V. Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)
4. Rudskoi A.I., Kondratiev S.Yu., Kokorin V.N. Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskih smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)
5. Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components. *Welding International*. August 2012. Vol. 26, № 8. P. 629–632.
6. Kondratiev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)
7. Kondratiev S.Yu., Popov V.O. Polucheniye iznosostoykogo kvazinanostrukturnogo poverkhnostnogo sloya v stalyakh i tsvetnykh splavakh lazernoy obrabotkoy. *Uprorochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*. 2011. № 2. S. 22–28. (rus.)
8. Murr L.E., Gaytan S.M., Ceylan A., Martinez E., Martinez J.L., Hernandez D.H., Machado B.I., Ramirez D.A., Medina F., Collins S., Wicker R.B. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Acta Materialia*. 2010. № 58. P. 1887–1894.
9. Biaino S., Penna A.U., Ackelid U., Sabbadini S., Tassa O., Fino P., Pavese M.P., Gennaro P., Badini C. Electron beam melting of Ti48Al2Cr2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation. *Intermetallics*. 2011. № 19. P. 776–781.
10. Rudskoi A.I., Kondratiev S.Yu., Sokolov Yu.A. Tekhnologiya posloynnogo elektronno-luchevogo sinteza poroshkovykh izdeliy v vakuume. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2014. № 8. S. 40–45. (rus.)
11. Musiyenko V.T. Osobennosti raspyleniya vrashchayushcheyusa zagotovki. *V kn.: Metallurgiya granul*. M.: VILS, 1986. Vyp. 3. S. 23–33. (rus.)
12. Musiyenko V.T. Zakonomernosti obrazovaniya granul pri tsentrobezhnom raspylenii vrashchayushcheyusa zagotovki. *V kn.: Metallurgiya granul*. M.: VILS, 1983. Vyp. 1. S. 41–48. (rus.)
13. ANSYS Basic Analysis Procedures Guide. ANSYS Realise 5.6. - ANSYS Inc, 1998.
14. Kaplun A.B., Morozov Ye.M., Olferyeva M.A. ANSYS v rukakh inzhenera: prakticheskoye rukovodstvo. M.: Yeditorial URSS, 2003. 272 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РУДСКОЙ Андрей Иванович — член-корреспондент РАН профессор ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: rector@spbstu.ru

СОКОЛОВ Юрий Алексеевич — кандидат технических наук главный конструктор ООО «НТК Электромеханика». 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: s5577@inbox.ru

AUTHORS

RUDSKOI Andrei I. — corresponding member of the RAS, St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: rector@spbstu.ru

SOKOLOV Yurii A. — «Electromechanica». 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: s5577@inbox.ru