

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВЗРЫВОМ НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ЗЕРЕН ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

А. Ф. Ильющенко¹, И. В. Фомихина¹, М. М. Дечко², В. Н. Ковалевский³

¹Институт порошковой металлургии, ул. Платонова, 41, 220005, г. Минск, Беларусь,
e-mail: iscentr@tut.by

²Белорусский аграрный технический университет, пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь,
e-mail: mdechko@rambler.ru

³Белорусский национальный технический университет, ул. Я. Коласа, 24, 220013, г. Минск, Беларусь,
e-mail: vn.kovalevskii@gmail.com

Поступила 30. 08. 2016 г.

В работе представлены результаты исследования зависимости размера зерна легированных высокопрочных сталей аустенитного, бейнитного, мартенситно-старееющего классов от температуры и степени деформации при нестационарной интенсивной пластической деформации взрывом. Установленные закономерности позволили построить модель, учитывающую зависимость коэффициента зернограничной диффузии от степени деформации температуры, позволяющую рассчитывать величину предела диспергирования.

Введение. В настоящее время в литературе имеется достаточно большое количество работ, посвященных исследованию закономерностей процесса диспергирования структуры металлов при интенсивной пластической деформации (ИПД) [1–4]. Как известно, развитая пластическая деформация сопровождается интенсивной фрагментацией – образованием в материале разориентированных микрообластей – фрагментов [5, 6]. По мере деформации разориентировки фрагментов увеличиваются, а их размеры постепенно уменьшаются, достигая некоторого предельного минимального значения d^* [6], которое обычно называют пределом деформационного измельчения или пределом диспергирования зерен [7, 8]. В работах В. Н. Чувильдеева, А. В. Нохрина, Ф. З. Утяшева, В. И. Копылова [1–9] моделируется процесс деформационного измельчения зерен поликристаллической структуры металлов, подвергнутых равноканальному угловому прессованию (РКУП) или (РКУ-деформации). Физика процесса базируется на рассмотрении внутризеренной пластической деформации под действием больших внешних напряжений, к накоплению на границах кристаллов сложной системы дефектов дислокационного (линейный дефект) и дисклинационного (дефект симметрии в результате его кручения или смеще-

ния оси симметрии) типов. Формирующиеся на границах зерен дефекты (стыковые дисклинации) порождают мощные поля внутренних напряжений, приводящих к скольжению зерен (аккомодационный процесс в микроструктуре) и движению дислокаций в зернах. Оборванные дислокационные границы, пересекаясь друг с другом, постепенно измельчают кристаллы.

Анализ литературных данных [1–9] показывает, что величина предела диспергирования d^* зависит от природы (структуры и свойств) материала, а также от выбранного режима ИПД: схемы деформации, ее скорости и температуры. В качестве модельных рассматриваются гомогенные микроструктуры металлов (Al, CuNi, Fe) и сплавов (Al–Mg), характеризующихся однородной поликристаллической структурой. Обобщение результатов позволяет сделать вывод, что величина предела диспергирования d_{\min} монотонно повышается с увеличением температуры деформации.

Для расчета минимального размера зерна (предела диспергирования) предложена зависимость:

$$(d^*)^{3,5} \geq \chi \frac{K}{G} \frac{\delta D_b^*}{A_1 \xi \xi} \frac{G \Omega}{kT}, \quad (1)$$

где $\chi = \psi / \varphi$ – геометрический коэффициент, в котором ψ – коэффициент пропорциональ-

ности, связывающий напряжение, вызывающее пластическую деформацию зерен, с пределом текучести материала, φ – геометрический множитель порядка 1; K – коэффициент Холла-Петча, связывающий предел текучести поликристаллического материала с размером зерна; G – модуль сдвига; δ – ширина границы, равная удвоенному вектору Бюргерса; D_b^* – коэффициент зернограницной диффузии, равный $D_b^* = D_{bo}^* \exp(-Q_b^*/kT)$; Q_b^* – энергия активации самодиффузии в равновесных границах зерен; Ω – атомный объем; T – температура процесса, К; $\dot{\epsilon}_v$ – локальная скорость деформации.

В работе [6] указывается, что энергия активации зернограницной диффузии в неравновесных границах зерен существенно зависит от избыточного свободного объема, связанного с внесенными в границу дефектами. При малой плотности внесенных дефектов наблюдаются обычные значения $Q_b \sim 9 kT_m$. При высокой плотности дефектов избыточный свободный объем может стать столь значителен, что энергия активации зернограницной диффузии может быть равной энергии активации диффузии в расплаве $Q_L \sim 3 kT_m$ [4]. Из чего следует, что этот параметр может быть переменным для различных условий деформирования (температуры и степени деформации).

D_{bo}^* – предэкспоненциальный множитель коэффициента зернограницной диффузии. В [2] приведено $D_{bo}^* = 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$. Там же утверждается, что полученное значение носит оценочный характер. Для точного вычисления величины d_{\min} необходима подробная информация о значениях D_b^* и зависимости $D_b(\dot{\epsilon}_v)$, а также сведения о величине локальной скорости деформации $\dot{\epsilon}_v$. Откуда, можно предположить, что D_{bo}^* меняется в широких пределах в зависимости от условий деформирования: k – постоянная Больцмана $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$; A_1 – численный параметр $A_1 = 10$ [1]; ξ – коэффициент однородности пластической деформации $\xi = 10^{-4}$ [1].

В данной работе исследуются процессы взрывного упрочнения при высокоскоростной деформации – интенсивной пластической деформации взрывом, имеющей место при распространении через металл сжимающего импульса с чрезвычайно резким фронтом, амплитудой, в 10–500 раз превышающей статический предел текучести, и временем возрастания приблизительно 10^{-9} с . Специфика взрывного упрочнения, связанная

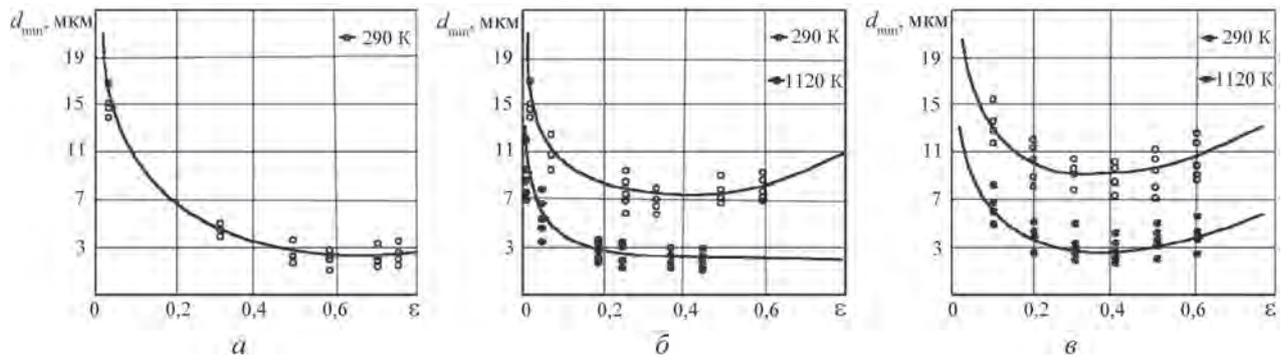
с волнообразным распространением нагрузки, высокими значениями амплитуды и кратковременностью процесса, приводит к резкому возрастанию плотности дефектов и обогащению структуры дефектами. Физика изучаемого процесса – это сверхбыстро протекающий процесс интенсивного нестационарного сжатия кристаллических зерен. Силовое воздействие на деформируемую заготовку реализуется в результате кратковременного и чрезвычайно интенсивного силового импульса. Проходящие при этом процессы принципиально отличаются от стационарных. На макроуровне деформирование происходит с нарастающей скоростью. Значительная часть механической энергии переходит в тепло. Температура обработанной заготовки увеличивается на несколько десятков градусов. На микроуровне локальные разогревы могут быть еще более значительными. Вследствие динамических силовых воздействий возможна значительная неоднородность упругой и пластической деформации. К тому же микроструктура высокопрочных сталей представляет собой сложную гетерогенную смесь зерен различного фазового и химического состава.

В связи с этим, целью данной работы явилось разработка модели диспергирования высокопрочных сталей под действием интенсивной пластической деформации взрывом на основе изучения их структуры и свойств в зависимости от различных технологических параметров взрыва.

Материал и методика исследования. Объектами исследования в данной работе служили высокопрочные стали бейнитного, аустенитного и мартенситно-старееющего классов, подвергнутые интенсивной пластической деформации взрывом. Оценка размера зерна осуществлялась металлографическим методом на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении $\times 1000$ (цена деления окуляра-микрометра 1 мкм).

Результаты исследования. В работе проведено экспериментальное и теоретическое исследование зависимости размера зерна легированных высокопрочных сталей аустенитного, бейнитного, мартенситно-старееющего классов от температуры и степени деформации при нестационарной интенсивной пластической деформации взрывом.

Предложена модель, позволяющая рассчитать величину предела диспергирования, учитыва-



Экспериментальные точки и расчетные зависимости предельного размера зерна от степени деформации для аустенитной стали 10X12Г14Н4ЮМ (а), бейнитной стали 38ХНЗМФА (б) и мартенситной стали 03Н18К9М5ТЮ (в)

ющая зависимость коэффициента зернограничной диффузии D_b от степени деформации ϵ_v и температуры.

$$d_{\min}(\epsilon) = \left(\chi k \frac{\delta D_{bo}(\epsilon) \exp\left(-Q_b(\epsilon) \frac{T_m}{T}\right) \Omega}{A_1 \xi c \epsilon} \right)^{1/2} \quad (2)$$

На основе кинематического уравнения фрагментации [9] выведена зависимость коэффициента зернограничной диффузии от степени деформации:

$$D_{bo}(\epsilon) = \beta_0 [\beta_1 \exp(-\beta_2) + 1] \quad (3)$$

Так как по мере накопления дефектов кристаллической структуры Q_b^* может меняться от $Q_b^* \sim 9 kT_m$ до $Q_b^* \sim 3 kT_m$, т. е. убывать [6], принято, что в зависимости от степени деформации и связанным с нею накоплением дефектов, это убывание линейно:

$$Q_b(\epsilon) = \beta_3 - \beta_4 \epsilon \quad (4)$$

На основе экспериментальных данных эмпирическим путем подобраны коэффициенты $\beta_0, \beta_1 \dots \beta_5$ и с использованием программы Mathcad выполнены расчеты и построены графики (см. рисунок).

Получены сопоставимые с экспериментальными значениями данные. Отклонение составляет 3–5 %. В приложении приведены листинги программы Mathcad, по которым выполнены расчеты.

Заключение. Результаты расчетов по формуле (1) и их сравнение с экспериментальными данными показывают удовлетворительное совпадение (отклонение не более 5 %) при степенях деформации до 20–30 %. Однако при использовании данной модели диспергирования при деформациях выше 30 % расхождение становится значительным (более 15 %), не учитывается физика процесса нестационарной интенсивной пластической деформации материала взрывом. Анализ экспериментальных данных и расчет по предложенной формуле (2) позволяет получить сопоставимые данные. Отклонение от экспериментальных данных составляет 3–5 %. Зависимость размера зерна от степени деформации показывает, что интенсивное измельчение под действием высокоскоростной пластической деформации взрывом высокопрочных сталей аустенитного, бейнитного и мартенситно-старееющего классов происходит при степенях деформаций порядка 20–30 %. Затем существует диапазон деформаций порядка 30–40 %, в котором изменение размера зерна практически отсутствует. При деформациях более 40–50 % накопленная пластическая деформация, вызывающая дополнительный локальный разогрев материала приводит к развитию рекристаллизационных процессов, в результате чего размеры зерна увеличиваются. При деформациях выше 50–60 % в материалах возможно появления трещин.

Литература

1. **Предел диспергирования при РКУ-деформации. Влияние температуры / В. Н. Чувильдеев [и др.] // Докл. РАН. – 2004. – Т. 396, № 3. – С. 332–338.**
2. **Чувильдеев, В. Н.** Предел измельчения зерен при РКУ-деформации / В. Н. Чувильдеев, В. И. Копылов // *Металлы.* – 2004. – № 1. – С. 22–35.
3. **Утяшев, Ф. З.** Деформационные методы получения наноструктурированных материалов и возможности их использования в авиадвигателестроении / Ф. З. Утяшев // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2009. – № 10 (67). – С. 7–11.

4. **Соотношение** Холла–Петча в нано- и микрокристаллических металлах, полученных методами интенсивного пластического деформирования / А. В. Нохрин [и др.] // Физика границ зерен в металлах, сплавах и керамиках. Вестн. Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского. – 2010. – № 5 (2). – С. 142–146.

5. **Чувильдеев, В. Н.** Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения / В. Н. Чувильдеев. – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.

6. **Чувильдеев, В. Н.** Микромеханизм деформационно-стимулированной зернограницной самодиффузии / В. Н. Чувильдеев // Физика металлов и металловедение. – 1996. – Т. 81, № 5. – С. 5–13; № 6. – С. 5–13; Т. 82, № 1. – С. 106–115.

7. **Нохрин, А. В.** Экспериментальные и теоретические исследования эволюции структуры субмикрокристаллических металлов, полученных методом интенсивного пластического деформирования: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / А. В. Нохрин. – Н. Новгород, 2014. – 320 с.

8. **Kaibyshev, O. A.** Superplasticity: Microstructural Refinement and Superplastic Roll Forming / O. A. Kaibyshev, F. Z. Utyashev // Futurepast. Arlington, VA22201 USA. – 2005. – P. 386.

9. **Утяшев, Ф. З.** Современные методы интенсивной пластической деформации / Ф. З. Утяшев. – Уфа: УГАТУ, 2008. – 313 с.

INFLUENCE OF INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION BY EXPLOSION ON GRAIN CRUSHING OF HIGH-RESISTANT STEELS

A. Ph. Pyushchenko¹, I. V. Fomikhina¹, M. M. Dechko², V. N. Kovalevskiy³

¹*Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus, e-mail: iscentr@tut.by*

²*Belarusian Agricultural Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: mdechko@rambler.ru*

³*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: vn.kovalevskii@gmail.com*

Research results of the dependence of the grain size of alloyed high-resistance steels of the austenitic, bainitic, maraging classes on temperature and degree of deformation at unsteady intensive plastic deformation by the explosion are presented in the work. The determined consistent patterns have made it possible to construct the model considering the dependence of grain-boundary diffusion coefficient on deformation degree and temperature allowing to calculate the value of limit atomization.