

07,19,01

Влияние ангармонизма на тепловыделение и упрочнение металлов при квазистатическом растяжении

© Ю.В. Судьенков^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

² Институт проблем машиноведения РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: y.sudenkov@yandex.ru

Поступила в Редакцию 1 июля 2019 г.

В окончательной редакции 22 июля 2019 г.

Принята к публикации 24 июля 2019 г.

Представлен анализ результатов экспериментальных исследований диссипации энергии и изменения коэффициента поперечных деформаций в ходе квазистатического растяжения металлов.

Рассматривается характер изменений этих процессов на разных стадиях деформирования — упругой, нелинейной, переходной от упругого к развитому пластическому течению и развитого пластического течения. Показано, что на всех стадиях наблюдается корреляция изменений независимо измеряемых параметров деформирования — температуры, коэффициентов поперечных деформаций и упрочнения.

Обсуждается определяющее влияние ангармонизма потенциала взаимодействия на характер процессов изменения модулей и диссипации на нелинейной стадии деформирования.

Ключевые слова: тепловыделение, коэффициента поперечных деформаций, касательные модули, ангармонизм.

DOI: 10.21883/FTT.2020.01.48749.541

1. Введение

До настоящего времени нет достаточно строгой теории, описывающей наблюдаемые закономерности процесса упругопластического деформирования металлов, в частности, переходные процессы от упругого отклика металлов к развитому пластическому течению.

Переходная стадия обычно занимает достаточно незначительное время процесса деформирования, но при этом происходящие на атомных и микро масштабах процессы, обусловленные ангармонизмом потенциала межатомного взаимодействия, определяют изменение внутренней энергии материала, начало перестройки его структуры и характер процесса развитого пластического течения.

При этом влияние ангармонизма потенциала межатомного взаимодействия сказывается уже на упругом этапе деформирования материалов и наглядно проявляется в изменении их температуры вследствие термоупругого эффекта [1–4]. В частности, на этапе упругого растяжения происходит снижение температуры материалов, описываемое для одноосной деформации соотношением [3,5]:

$$\frac{\Delta T}{T_0} = -\gamma(1 - 2\nu)\epsilon, \quad (1)$$

где γ — параметр Грюнайзена, характеризующий ангармонизм межатомного потенциала, ν — коэффициент Пуассона, ϵ — деформация.

На этапе развитого пластического течения повышение температуры определяется в основном сопротивлением

относительному движению элементов микроструктуры под действием внешней силы, которое обычно характеризуется параметром вязкости и/или коэффициентом трения [6–8].

В то же время остается не достаточно ясным вопрос о физическом механизме, определяющем повышение температуры на нелинейной стадии деформирования, переходной от упругой к развитому пластическому течению.

Одной из важнейших характеристик деформирования твердых тел является коэффициентом поперечных деформаций (Пуассона), значение которого обусловлено действием внутренних сил, возникающих вследствие деформаций, происходящих одновременно во взаимно перпендикулярных, относительно действия внешней силы, направлениях.

Такой сложный характер межатомного взаимодействия в процессе деформирования твердых тел определяет взаимосвязь коэффициента поперечных деформаций (Пуассона) и коэффициента Грюнайзена, продемонстрированную в работах [9–11]:

$$\nu = \frac{4/3\gamma - 1}{2\gamma + 1} \quad (2)$$

В интервале теоретически возможных значений коэффициента Пуассона $-1 < \nu < 0.5$ величина коэффициента Грюнайзена будет меняться в диапазоне $0 < \gamma < 4.5$. При этом, например для значения $\nu = 0.25$, вычисляемому в предположении действия центральных сил и

выполнения условий Коши $\gamma = 1.5$, а для характерного для многих металлов значения $\nu \cong 1/3$ коэффициент Грюнайзена равен известному значению $\gamma \cong 2$.

Такая взаимосвязь механического и термодинамического параметров может в существенной мере определять процессы деформирования на переходной нелинейной стадии.

Таким образом, изучение процессов тепловыделения и поведения коэффициента поперечной деформации при деформировании металлов, представляет весьма актуальную задачу механики и физики твердого тела.

В работах [12,13] были представлены результаты экспериментальных исследований процессов тепловыделения и изменения коэффициентов поперечной деформации при одноосном растяжении образцов из меди М1, магниевого сплава AZ31В, титана ВТ6, стали 12Х18Н10Т и ст.3, а также алюминиевого сплава Д16АМ. Анализ результатов этих исследований является целью данной работы.

2. Методика и результаты

Кратко напомним методику измерений и полученные в [12,13] результаты.

Квазистатическое растяжение стандартных плоских образцов с размерами рабочей части $50 \times 5 \times 2$ мм проводилось на универсальной испытательной машине SHIMADZU AG-X50в при комнатной температуре. Изменение температуры образцов определялось по инфракрасному излучению, регистрировавшемуся тепловизионной камерой ThermoCAM SC 3000 с частотой 50 Hz.

На рис. 1, *a* приведен кадр тепловизионной съемки и обозначена область, по которой усреднялись регистрируемые изменения температуры при деформировании. На рис. 1, *b* представлены зависимости изменения температуры в образцах титана при скоростях деформирования 5, 10, 20, 50 mm/min.

Значение коэффициента поперечной деформации определялись по измерению скоростей продольных (c_L) и поперечных волн (c_T) в процессе растяжения образцов [14]:

$$\nu = \frac{c_L^2 - 2(c_T)^2}{2[c_L^2 - (c_T)^2]}. \quad (3)$$

Для измерений скоростей звука непосредственно в процессе деформирования, применялся оптико-акустический метод [15], основанный на зондировании образца (1) короткими акустическими импульсами, возбуждаемыми наносекундными лазерными импульсами (2), следующими с частотой 1 Hz. Регистрация сигналов с пьезодатчика (3) осуществлялась осциллографом Лесгоу с $\Delta f = 600$ MHz. Методика позволяла измерять скорости упругих волн с погрешностью не хуже 0.1%.

На рис. 1, *c, d* представлены схема измерений, осциллограммы лазерного импульса (I_L) и типичные сигналы с пьезодатчика, регистрирующего упругие импульсы продольных (L) и поперечных (T) упругих волн.

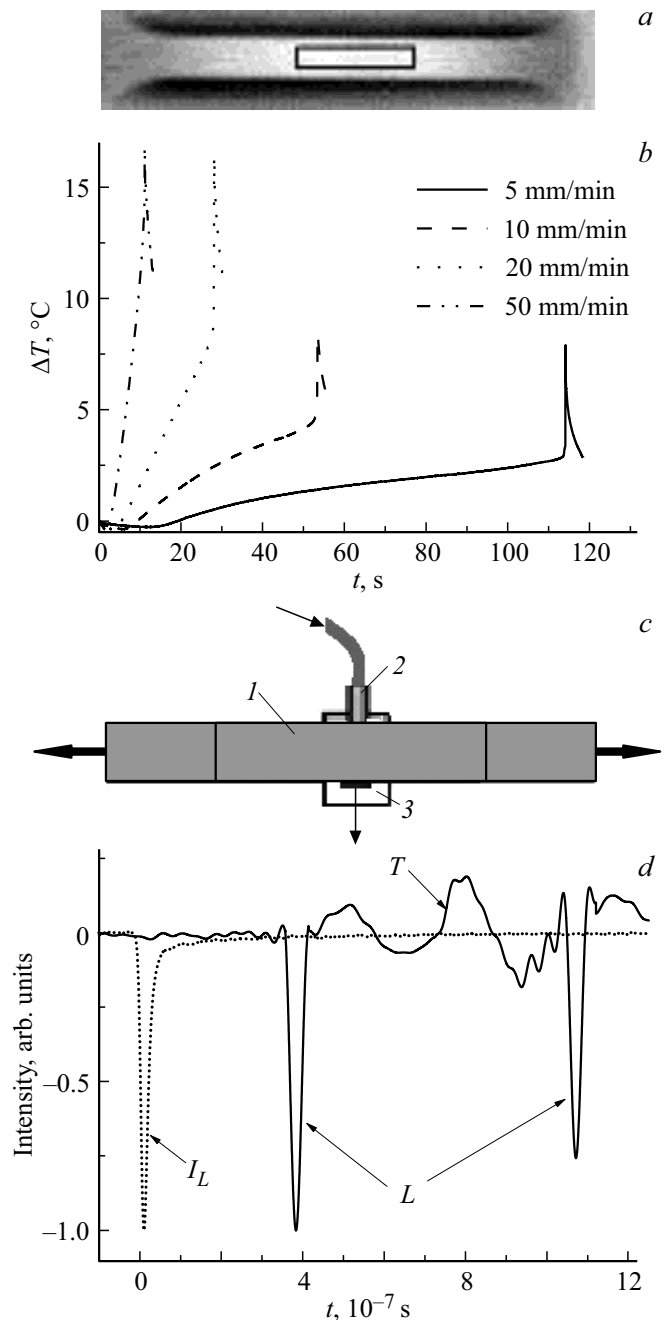


Рис. 1. Кадр тепловизионной съемки и зависимости изменения температуры в образцах титана — *a, b*; схема измерений упругих волн и типичные сигналы лазерного импульса (I_L), и импульсы с пьезодатчика (L), (T) в образцах стали Ст.3 — *c, d*.

На рис. 2, *a, b* приведены экспериментальные диаграммы $\sigma(\epsilon)$ и зависимости температуры $T(\epsilon)$ для образцов меди М1 (рис. 2, *a*) и стали Ст.3 (рис. 2, *b*) при скорости деформирования 5 mm/min. На вставках увеличенные фрагменты этих зависимостей соответствующие упругому и нелинейному этапам деформирования.

На рис. 2, *c, d* представлены зависимости $\sigma(\epsilon)$ и коэффициента поперечной деформации $\nu_{td}(\epsilon)$.

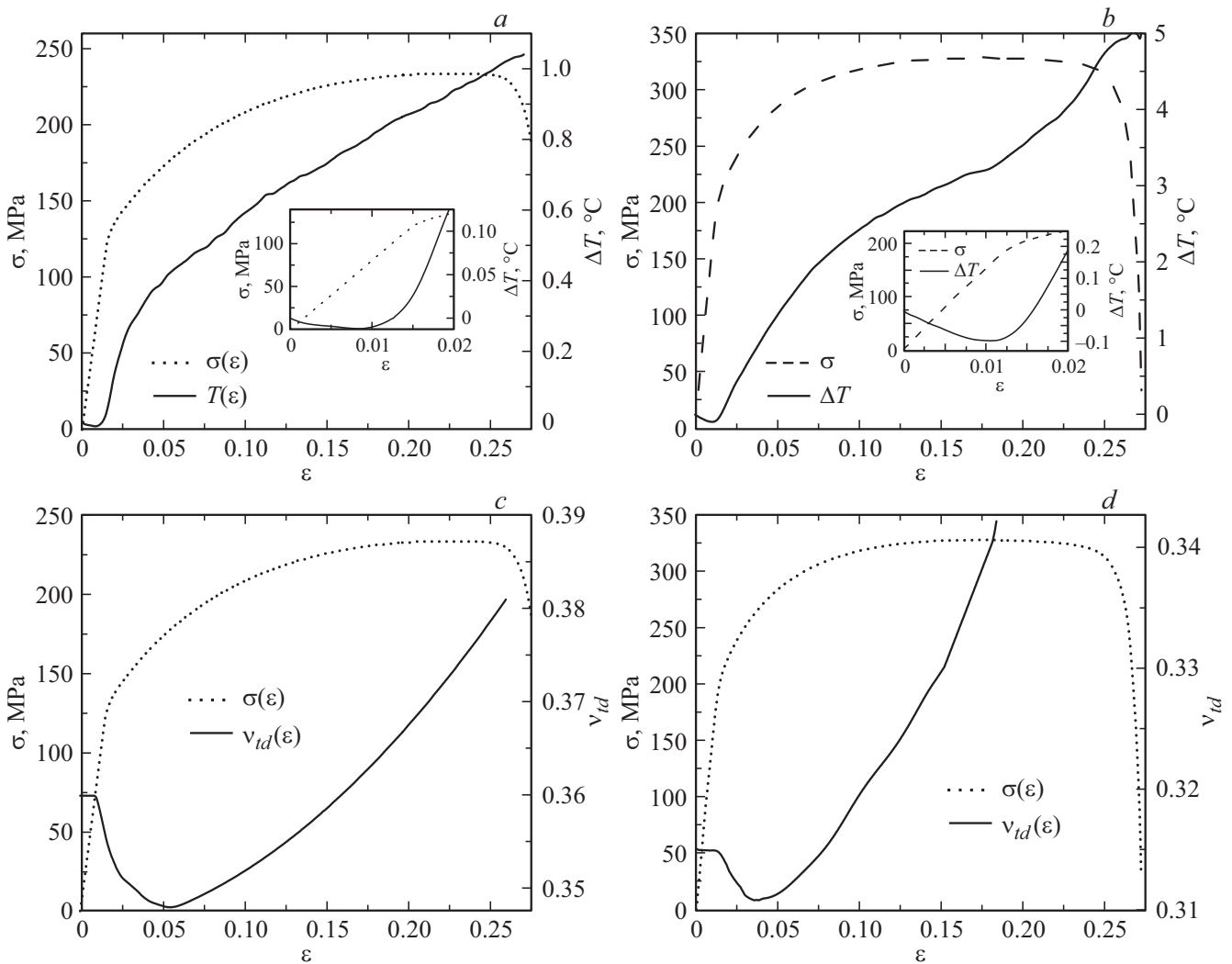


Рис. 2. Зависимости $\sigma(\epsilon)$ и температуры $T(\epsilon)$ — *a, b*, и коэффициента поперечной деформации $\nu_{ld}(\epsilon)$ — *c, d* при растяжении образцов меди М1 (*a, c*) и стали Ст.3 (*b, d*).

Наблюдается немонотонный характер изменений как температуры, так и коэффициента поперечных деформаций в процессе деформирования.

На этапе упругого растяжения происходит незначительное, на десятые доли градуса, снижение температуры образцов в результате термоупругого эффекта, описываемого для одноосной деформации соотношением (1).

Быстрое увеличение температуры образца, начинающееся на нелинейной стадии упрочнения, сменяется более медленным ростом в процессе развитого пластического течения.

Немонотонный характер наблюдается и для изменений коэффициента поперечной деформации. Незначительное снижение ν_{ld} в области упругости сменяется существенным уменьшением на нелинейной стадии упрочнения и ростом в области развитого пластического течения. Подобное уменьшение ν_{ld} до стадии развитого пластического течения наблюдалось в целом ряде

исследований различных металлов, результаты которых приведены в [16].

Качественно подобный характер процесса тепловыделения и изменения коэффициента поперечной деформации регистрировался во всех исследованных металлах и при разных скоростях деформирования [12,13].

3. Анализ и обсуждение результатов

На рис. 3, *a, b* приведены зависимости от деформации коэффициента упрочнения (касательных модулей) $\theta = d\sigma/d\epsilon$, изменения температуры $dT/d\epsilon$ и коэффициента поперечной деформации — $d\nu_{ld}/d\epsilon$ для образца меди, а на рис. 3, *c, d* аналогичные зависимости для образца стали Ст.3.

В таком представлении особенно наглядно проявляется взаимосвязь и корреляция процессов тепловыделения, изменения коэффициента поперечных деформаций и

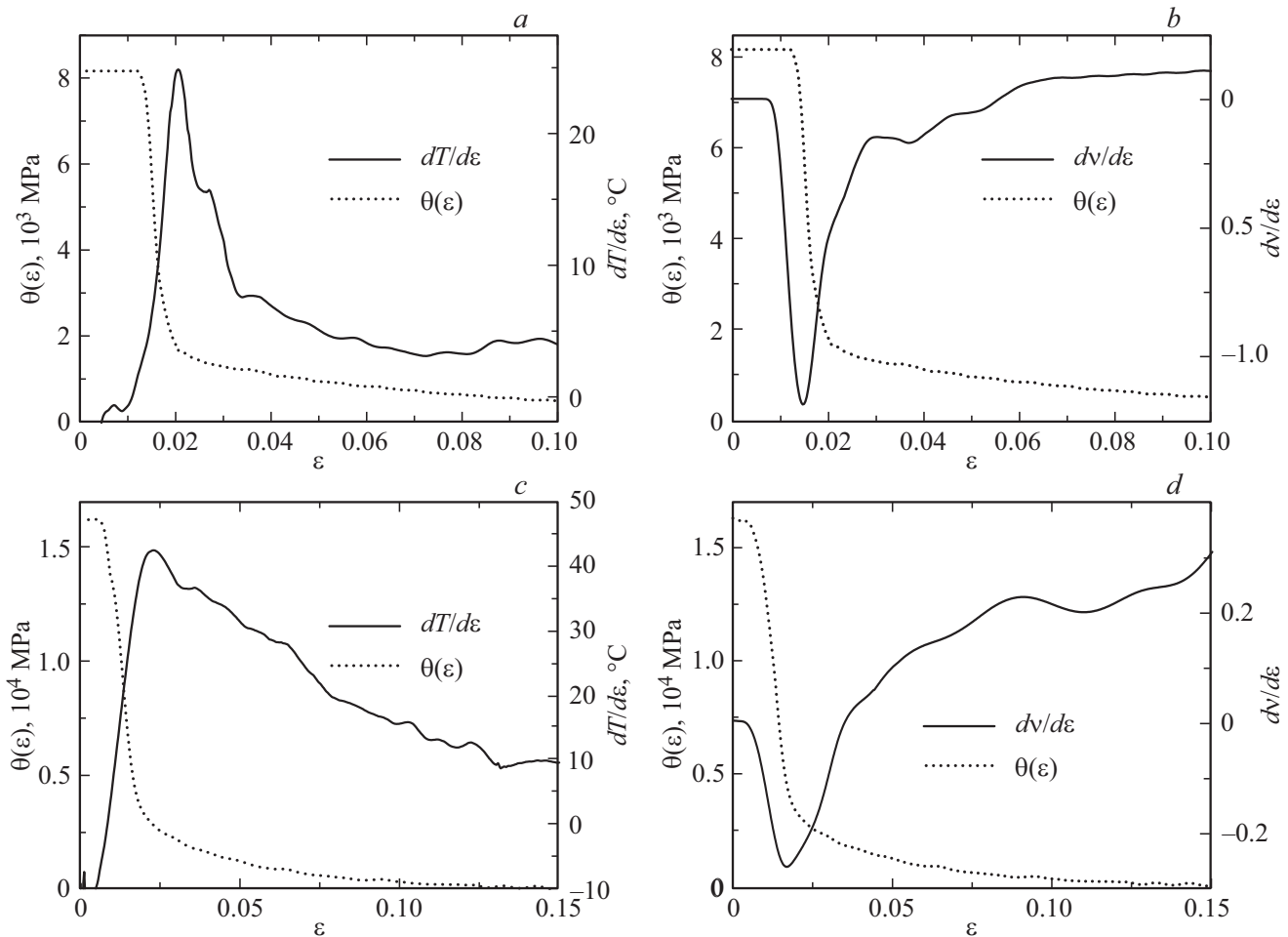


Рис. 3. Зависимости упрочнения θ , $\partial T/\partial \epsilon$ и $\partial v_{td}/\partial \epsilon$ от деформации при растяжении образцов меди М1 — *a, b*; и стали Ст.3 — *c, d*.

касательных модулей на нелинейной стадии деформирования.

Как видно, форсированный рост температуры и активное уменьшение v_{td} наблюдается на нелинейной стадии деформирования, характеризуемой резким уменьшением θ .

На стадии развитого пластического течения, с низким значением θ , наблюдается снижение интенсивности тепловыделения и рост коэффициента поперечных деформаций v_{td} .

Наблюдаемое поведение процесса тепловыделения и коэффициентов поперечной деформации, по-видимому, обусловлено определяющим влиянием ангармонизма на переходном этапе деформирования. Проиллюстрировать такое влияние можно на простой модели.

Рассмотрим растяжение плоской квадратной конструкции вдоль одной из диагоналей силой F_y . Жесткость упругих элементов, соединяющих вершины и центр квадрата положим равными K_y , а для диагонали ортогональной действию силы — K_x . Такая конструкция, по сути, является моделью одной из плоскостей кубической решетки.

С учетом малости смещения узлов и условий равновесия системы после действия силы, для изменения длин диагоналей, то есть коэффициента поперечной деформации квадрата, и отношения напряжений упругих элементов в диагоналях квадрата, достаточно просто получить выражения

$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{1}{1 + K_x/K_y}; \quad \frac{K_x \Delta x}{K_y \Delta y} = \frac{1}{1 + K_y/K_x}. \quad (4)$$

Соотношения (4) демонстрирует уменьшение отношения изменений длин диагоналей, то есть коэффициента поперечных деформаций, и при этом рост напряжений сжатия в поперечном сечении квадрата, в случае возрастания отношения жесткостей диагоналей $K_x/K_y > 1$.

Подобная ситуация будет реализовываться и в плоскостях реальных кристаллов.

В случае одноосного растяжения кристаллических твердых тел, по завершению упругого процесса деформирования, ангармонизм потенциала взаимодействия будет приводить к уменьшению коэффициента поперечных деформаций и возрастанию внутренних напряжений сжатия в поперечном сечении.

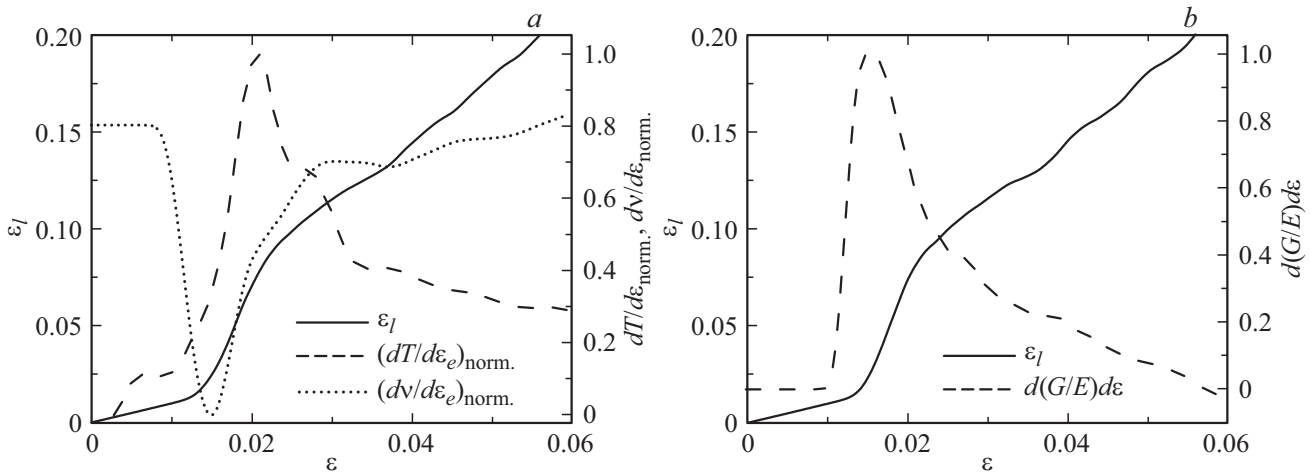


Рис. 4. Зависимости $\varepsilon_l(\varepsilon)$ и нормированные зависимости $\partial T/\partial \varepsilon$ и $\partial v_{id}/\partial \varepsilon$ — *a*; зависимости $\varepsilon_l(\varepsilon)$ и $\partial/\partial \varepsilon(G/E)$ при растяжении образцов меди М1 — *b*.

В результате этого снижение температуры образца, соответствующее упругой стадии растяжения, сменится ее ростом (вставки на рис. 2, *a,b*).

Интерес представляет анализ поведения деформации на разных стадиях деформирования. Экспериментальные диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ могут быть записаны в виде [8,17]:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - \omega), \tag{5}$$

где E — модуль Юнга, ω — безразмерная функция деформации (функция А.А. Ильюшина), возрастающая от 0 до 1, при напряжениях меньше предела пропорциональности материала $\omega = 0$.

Функцию А.А. Ильюшина запишем в виде

$$\omega = 1 - \frac{\partial \sigma / \partial \varepsilon}{E}. \tag{6}$$

С учетом (5) и (6) локальное изменение деформации $\varepsilon_l(\varepsilon)$, соответствующее значению напряжения в точке диаграммы растяжения выражается соотношением

$$\varepsilon_l(\varepsilon) = \frac{\sigma}{E(1 - \omega)}. \tag{7}$$

На рис. 4, *a* представлены построенные таким образом зависимости локальной деформации $\varepsilon_l(\varepsilon)$, и нормированные зависимости $\partial T/\partial \varepsilon$ и $\partial v_{id}/\partial \varepsilon$ при растяжении образца меди.

Видно, что все существенные изменения независимо измеряемых параметров — температуры, коэффициента поперечных деформаций и локальной деформации, получаемой из диаграммы растяжения, наблюдаются на переходной нелинейной стадии деформирования.

На рис. 4, *b* приведены зависимость $\varepsilon_l(\varepsilon)$ и нормированная зависимость изменения отношения модулей сдвига и упругости $\partial/\partial \varepsilon(G/E)$, построенные на основе соотношений теории упругости с учетом изменения v_{id} на нелинейном этапе деформирования образца меди М1.

Для качественного анализа переходной стадии деформирования использование соотношений теории упругости при малых нелинейных деформациях вполне допустимо [17].

Наблюдаемый скачок величины локальной деформации $\varepsilon_l(\varepsilon)$ обусловлен увеличением напряжений сжатия в поперечном сечении образца при одновременном действии внешней растягивающей силы. Этот процесс сопровождается возрастанием сопротивления сдвигу (рис. 4, *b*) и ростом температуры образца (рис. 4, *a*).

Таким образом, на нелинейной стадии деформирования очевидна корреляция изменений параметров деформирования, обусловленная, определяющим влиянием ангармонизма потенциала взаимодействия, проявляющимся, по-видимому, как на атомном, так и мезо масштабах микроструктуры.

При дальнейшем увеличении нагружения достигаются энергии активации процессов движения и размножения дислокаций, то есть активизируется процесс перестройки структуры материалов с образованием сложных мезоскопических дефектных структур [18,19].

Этот процесс приводит к генерации внутренних источников тепла и нагреву образца, что в свою очередь увеличивает интенсивность процессов структурной перестройки и сопровождается снижением жесткости металлов, то есть ростом коэффициента поперечной деформации, снижением сопротивления сдвигу и началу процесса развитого пластического течения.

4. Заключение

Таким образом, анализ результатов исследований тепловыделения и поведения коэффициентов поперечных деформаций при квазистатическом растяжении металлов показывает, что существенные изменения термодинамических и механических параметров процесса пла-

стического деформирования коррелируют со стадиями пластического деформирования.

Наблюдаемая взаимосвязь изменения параметров деформирования на нелинейной переходной стадии определяется, в первую очередь, влиянием ангармонизма потенциалов межатомного взаимодействия, проявляющимся, по-видимому, как на атомных, так и мезо масштабах микроструктуры материалов.

То есть, ангармонизм потенциалов взаимодействия определяет значение модулей и термодинамику переходной нелинейной стадии деформирования кристаллических твердых тел и, как следствие, активацию процессов структурных преобразований.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 15-19-00182.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Г. Лейбфрид, В. Людвиг. Теория ангармонических эффектов в кристаллах. ИЛ, М. (1963). С. 229.
- [2] Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. Мир, М. (1979). Т. 2. С. 422.
- [3] С.Е. Bottani, G. Caglioti. Europhys. News **14**, 12, 10 (1983).
- [4] А.С. Лукьяненко. ФТТ **56**, 11, 2187 (2014).
- [5] В.С. Постников. Физика и химия твердого состояния. Металлургия, М. (1978). С. 544.
- [6] В.В. Федоров. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Фан, Ташкент (1979). 168 с.
- [7] В.И. Трефилов, В.Ф. Моисеев, Э.П. Печковский. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. Наук. думка, Киев (1987). С. 236.
- [8] Н.Н. Малинин. Прикладная теория пластичности и ползучести. Машиностроение, М. (1975). 400 с.
- [9] К.Л. Леонтьев. Акуст. журн. **27**, 4, 554 (1981).
- [10] В.Н. Беломестных, Е.П. Теслева. ЖТФ **74**, 8, 140 (2004).
- [11] Д.С. Сандитов, В.В. Мантатов, Б.Д. Сандитов. ЖТФ **79**, 4, 150 (2009).
- [12] Б.А. Зимин, И.В. Смирнов, Ю.В. Судьенков. ДАН **474**, 4, 432 (2017).
- [13] Б.А. Зимин, В.Е. Свентицкая, Ю.В. Судьенков. ФТТ **60**, 4, 754 (2018).
- [14] Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. Мир, М. (1972). С. 307. [R. Truell. Ultrasonics methods in solid state physics/ Eds Ch. Elbaum, B. Chick. Academic Press, N. Y. (1969).]
- [15] Ю. Судьенков, Б. Зимин, Н. Вовненко. Термомеханическая реакция твердых тел при лазерном воздействии. LAM Acad. Publish., Saarbruc (2011). С. 113.
- [16] В.А. Кузменко. Новые схемы деформирования твердых тел. Наук. думка, Киев. (1973). 200 с.
- [17] В.В. Новожилов. Основы нелинейной теории упругости. Гостехиздат, М.–Л. (1948). 215 с.
- [18] Н.А. Конева, Э.В. Козлов. В сб.: Структурные уровни пластической деформации и разрушения / Под ред. В.Е. Панина. Наука, Новосибирск. (1990). С. 123.
- [19] В.Г. Малинин, Н.А. Малинина. Вопросы материаловедения **1**, 29, 123 (2002).

Редактор Т.Н. Василевская