

14,01

## Вклад работ изменения объема и деформаций сдвига в энергетический баланс при одноосном растяжении металлов. Эксперимент

© Ю.В. Судьенков

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: y.sudenkov@yandex.ru

Поступила в Редакцию 14 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 9 января 2024 г.

Принята к публикации 15 января 2024 г.

Представлены результаты исследований энергетического баланса в процессе квазистатического растяжения металлов. Методика одновременной регистрации тепловыделения и контроля изменения коэффициента поперечных деформаций позволила оценить вклад работ изменения объема и деформаций сдвига в энергетический баланс на всех стадиях пластического течения металлов. Полученные результаты продемонстрировали определяющий вклад сдвиговых деформаций в изменение латентной энергии при пластическом течении металлов. Приведена оптико-акустическая методика измерения скоростей продольных и поперечных волн, возбуждаемых в материалах при воздействии лазерных импульсов в процессе квазистатического растяжения.

**Ключевые слова:** растяжение, металлы, тепловыделения, контроль коэффициента поперечных деформаций, изменения объема, деформации сдвига, энергетический баланс.

DOI: 10.61011/FTT.2024.02.57257.204

### 1. Введение

До сих пор нет достаточно строгой теории, описывающей в полной мере закономерности процессов нелинейного деформирования материалов, в частности, пластического течения металлов. Например, этап перехода от упругой реакции металлов к пластическому течению, обычно занимает достаточно незначительное время процесса деформирования, но при этом происходящие на атомных и микро масштабах процессы, 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 [1,2]:

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

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $\varepsilon$  — деформация,  $\gamma = \beta K / \rho c_v$  — параметр Грюнайзена,  $\beta$  — коэффициент теплового расширения, изотермический коэффициент объемного сжатия,  $c_v$  — удельная теплоемкость,  $\rho$  — плотность.

Параметр Грюнайзена, характеризующий ангармонизм межатомного потенциала, и определяемый совокупностью термодинамических и механических характеристик состояния материала и как показано в ряде работ

однозначно связан с коэффициентом Пуассона [3–5]:

$$\nu = \frac{4}{3} \frac{\gamma - 0.75}{2\gamma + 1}; \quad \gamma = \frac{3}{2} \frac{(1 + \nu)}{(2 - 3\nu)}. \quad (2)$$

Т.е. коэффициент Пуассона, или коэффициент поперечных деформаций в механике деформируемого твердого тела, по сути, является аналогом ангармонического параметра Грюнайзена, а его связь с отношением модулей жесткости ( $E$ ) и сдвига ( $G$ ) определяет поведение материалов при деформировании

$$\nu_{td} = \frac{1}{2} \frac{E}{G} - 1; \quad \gamma = \frac{3}{2} \frac{E}{(10G - 3E)}. \quad (3)$$

При этом факт того, что коэффициент поперечной деформации определяется деформациями, происходящими одновременно во взаимно перпендикулярных направлениях, ортогональных направлению действия внешней силы, то есть действиями внутренних сил, выражает его потенциальную чувствительность к структурным перестройкам при деформировании материалов [6–8].

В процессе нелинейного деформирования в каждый момент времени испытываемый материал находится в новом состоянии, которые определяются перестройкой структуры, обусловленной, в первую очередь, действием сдвиговых напряжений, а также процессами взаимодействия и формирования мезоструктур, характерных для разных стадий деформирования [9,10]. Например, в металлах на стадии пластического течения выделяется до четырех этапов, различающихся характером и масштабами структурных преобразований [11,12].

Таким образом, измерения коэффициента поперечных деформаций открывают возможности получения дополнительной информации о нелинейных процессах деформирования, механизмах и этапах развития пластического течения металлов.

Известно, что для оценки напряженно-деформированного состояния и структурных преобразований в твердых телах широкое применение находят акустические методы, демонстрирующие взаимосвязь изменений скорости и затухания ультразвука как с изменениями напряжений в материалах, так и с изменениями их структуры, в том числе и в процессе деформирования материалов [13–17].

При этом, современные методы лазерной оптоакустики существенно расширяют информативность акустической диагностики, в частности за счет возможности одновременного возбуждения импульсов как продольных, так и поперечных волн в твердых тел. Кроме того, при такой методике диагностика состояния среды осуществляется за времена много меньшие времени изменения параметров квазистатического нагружения, а энергия, возбуждаемых лазерным излучением акустических импульсов, много меньше характерных энергий активации механизмов пластической деформации.

В этой связи, регистрация скорости  $c_L$  и  $c_t$  продольных и поперечных волн в исследуемом образце позволяет использовать известные соотношения [13] для определения коэффициента поперечной деформации ( $\nu_{id}$ ) и в процессе нелинейного поведения материалов при деформировании. При этом влияние изменения толщины образца при деформировании не влияет на точность определения  $\nu_{id}$ :

$$\nu_{id} = \frac{c_L^2 - 2c_t^2}{2[c_L^2 - c_t^2]}; \text{ или } \nu_{id} = \frac{t_L^2 - 2(t_t)^2}{2[t_L^2 - (t_t)^2]}, \quad (4)$$

где  $t_L$  и  $t_t$  — времена распространения продольной и поперечной волн в образце.

В исследованиях поведения твердых тел при действии внешних нагрузок существенный интерес представляет анализ характера изменений энергетического баланса в ходе структурных перестроек на разных стадиях процесса деформирования.

Традиционно энергетический баланс определяется равенством работы деформации ( $W$ ) сумме выделяющегося тепла ( $Q$ ) и скрытой, латентной ( $L$ ) энергии  $W = Q + L$ .

Однако при традиционном анализе энергетического баланса не обсуждаются затраты работы внешних сил на изменение объема и на деформации сдвига которые могут различаться на разных этапах деформирования и определяться механизмами структурных перестроек под действием, в первую очередь, микронапряжений сдвига [7–12].

В этой связи, очевидна ограниченность традиционного анализа энергетического баланса деформирования материалов и требуются дальнейшие исследования, представ-

ляющие актуальную задачу механики и физики твердого тела.

К настоящему времени практически все теории пластичности базируются на разделении жесткости материала на два механизма деформирования, один из которых определяет изменение формы, а другой — изменение объема. При этом ответственность за все виды нелинейного поведения материала определяется механизмом изменения формы и на этой основе построены практически все теории пластичности и ползучести [18,19].

Подобного рода модель, основывающаяся на двух механизмах изменения состояния твердых тел в процессе деформирования, была предложена Кузьменко [7,8,17], в которой работа внешних сил определялась затратами на изменение объема и на изменение поперечных деформаций, частично компенсирующее изменение объема за счет действия объемных (внутренних) сил

$$W = W_v + W_s, \quad (5)$$

где  $W$  — работа внешних сил,  $W_v$  — работа затраченная на изменение объема,  $W_s$  — работа затраченная на деформации сдвига.

При этом в [8,17] было показано и обосновано, что доли работ изменения объема и сдвиговых деформаций определяются коэффициентом поперечных деформаций  $\nu_{id}$ :

$$\frac{W_v}{W} = \nu_{id}(1 + 3\nu_{id} + 3\nu_{id}^2)/(1 + \nu_{id}),$$

$$\frac{W_s}{W} = (1 - 3\nu_{id}^2 - 3\nu_{id}^3)/(1 + \nu_{id}). \quad (6)$$

Разделить вклады этих работ при анализе энергетического баланса можно записав работу внешних сил (5) в следующем виде:

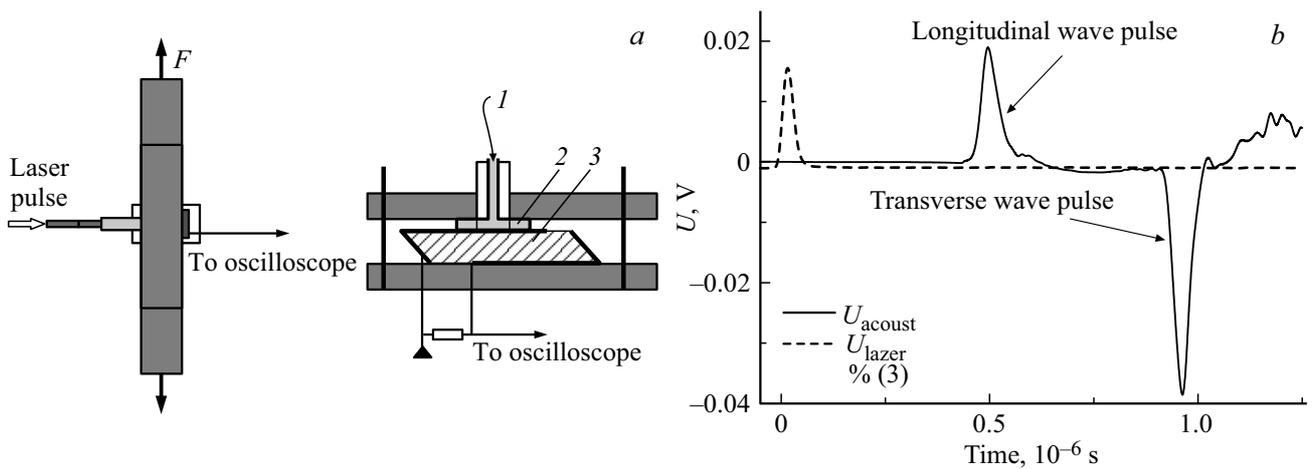
$$W = (Q + L) \left( \frac{W_v}{W} + \frac{W_s}{W} \right) = Q_v + L_v + Q_s + L_s. \quad (7)$$

Т.е. измерения коэффициента поперечных деформаций и тепловыделения в процессе деформирования могут позволить получать дополнительную информацию как об изменении энергетического баланса, так и об этапах нелинейного процесса деформирования, в частности, пластического течения металлов.

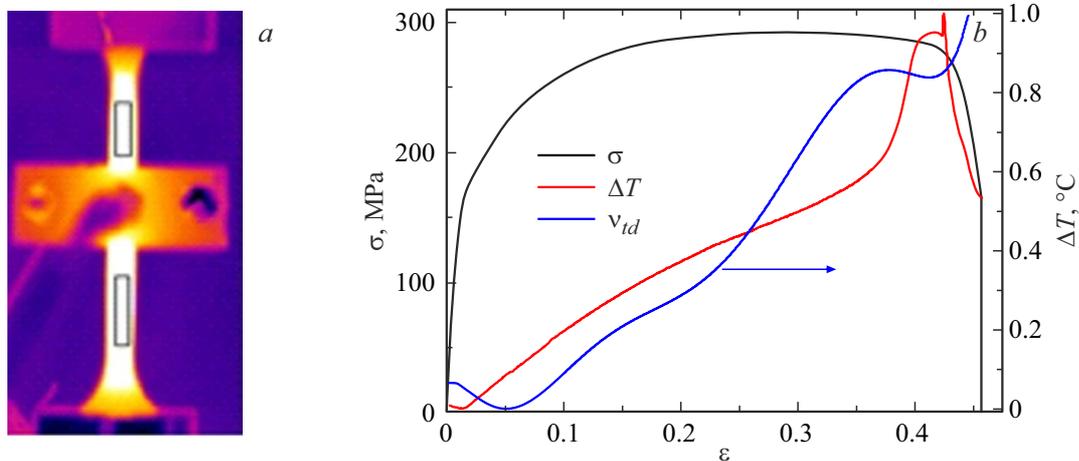
## 2. Методика исследований

С этой целью была разработана методика для одновременной регистрации тепловыделения и изменения коэффициента поперечных деформаций в процессе одноосного растяжения материалов.

Квазистатическое растяжение стандартных плоских образцов с размерами рабочей части  $50 \times 5 \times 2$  mm проводилось на универсальной испытательной машине SHIMADZU AG-X50v при комнатной температуре при скоростях деформирования 5 и 20 mm/min. Изменение



**Рис. 1.** Схема измерений. (а): 1 — оптическое волокно, 2 — образец, 3 — пьезодатчик; б — осциллограммы лазерного импульса и типичные сигналы с пьезодатчика в образце стали-Ст3.



**Рис. 2.** а — кадр тепловизионной съемки и области регистрации изменения температуры; б — зависимости  $\sigma(\epsilon)$ , нормализованные зависимости  $T(\epsilon)$  и  $\nu_{td}(\epsilon)$  в образце стали-Ст3.

температуры образцов контролировалось по инфракрасному излучению, регистрировавшемуся тепловизионной камерой ThermoCAM SC 3000 с частотой 50 Hz.

Для определения коэффициента поперечных деформаций непосредственно в процессе растяжения, применялся оптико-акустический метод [15], основанный на зондировании образца короткими акустическими импульсами, возбуждаемыми наносекундными импульсами лазера, следующими с частотой 1 Hz. Значение коэффициента поперечной деформации в процессе растяжения образцов определялись по соотношению (4).

На рис. 1, а представлена схема измерений. Доставка лазерного излучения с длительностью  $\tau_{0,5} = 10^{-8}$  s и энергией  $E \leq 10^{-3}$  J осуществлялась с помощью оптоакустического волокна (1) диаметром 0.9 mm. При таком воздействии в исследуемых образцах возбуждается импульс как продольной, так и поперечной волны.

С целью повышения точности измерения  $t_l$  и  $t_t$  была реализована одновременная регистрация импульсов про-

дольных и поперечных волн одним датчиком из пьезокерамики. Для этого пьезопластина толщиной 3 mm вырезалась из толстой плоскопараллельной пьезокерамики ЦТС19 под углом  $\sim 45^\circ$  к направлению ее поляризации. Далее на поверхности пластины напылялись электроды. Регистрация сигналов с пьезодатчика (3) осуществлялась осциллографом Lecroy с  $\Delta f = 600$  MHz.

Такая методика позволяла измерять  $t_l$  и  $t_t$  с погрешностью менее  $\pm 0.5\%$ , а скорости акустических импульсов продольных и поперечных волн с погрешностью менее  $\pm 1.5\%$ .

Типичные осциллограммы лазерного импульса и сигнала с пьезодатчика при растяжении образца стали приведены на рис. 1, б.

На рис. 2, а представлена методика одновременной регистрации тепловыделения и определения коэффициента поперечных деформаций и при растяжении образца стали. Прямоугольниками отмечены области усреднения изменения температуры образца. На рис. 2, б приведены

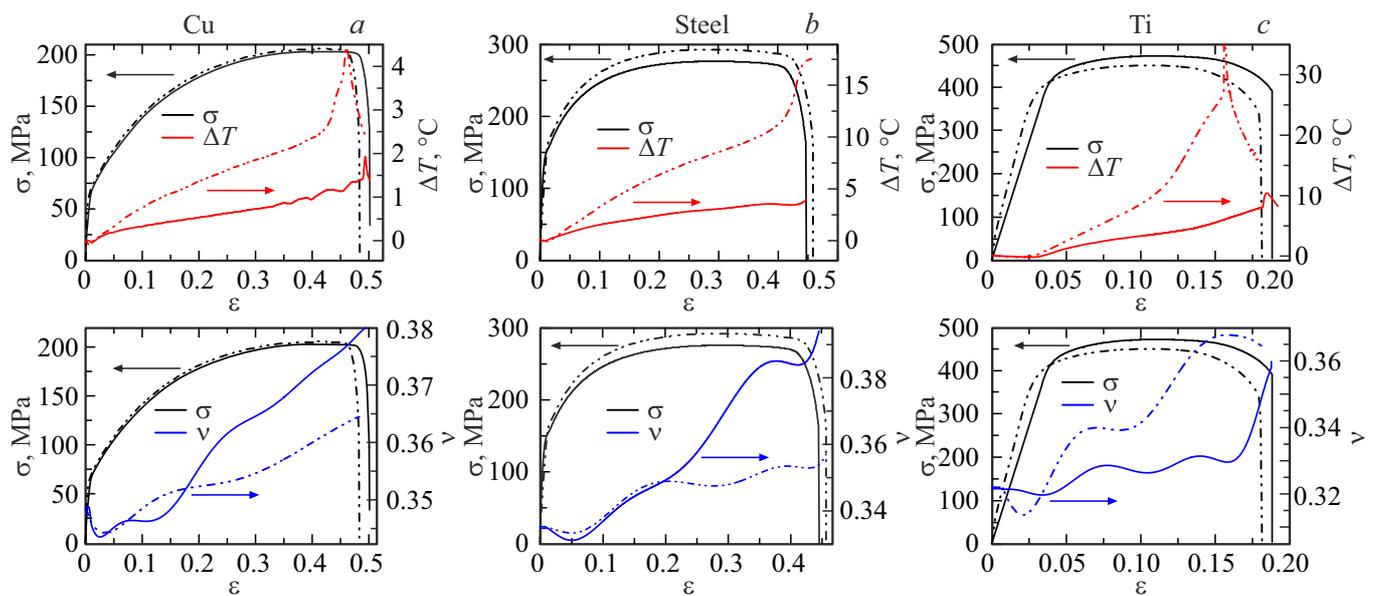


Рис. 3.  $a, b, c$  — зависимости  $\sigma(\epsilon)$ ,  $T(\epsilon)$  и  $v_{id}(\epsilon)$  образцов меди, стали и титана при одноосном растяжении со скоростями деформирования 5 и 20 mm/min.

полученные для образца стали зависимости  $\sigma(\epsilon)$  и нормированные зависимости  $T(\epsilon)$  и  $v_{id}(\epsilon)$ .

### 3. Обсуждение результатов

Результаты одновременной регистрации изменения коэффициентов поперечных деформаций, тепловыделения и анализа энергетического баланса для образцов трех металлов — медь-М1, сталь-ОМ, титан-ВТ1 приведены на рис. 3,  $b$ . Сплошные кривые на всех рисунках соответствуют скорости деформирования 5, штрихпунктирные — 20 mm/min.

На рис. 3,  $a, b, c$  представлены результаты измерений зависимостей  $\sigma(\epsilon)$  и  $T(\epsilon)$  при одноосном растяжении со скоростями деформирования 5 и 20 mm/min. Увеличение скорости деформирования естественно приводит к увеличению тепловыделения [20].

На рис. 3,  $a-c$  также приведены зависимости коэффициентов поперечных деформаций для образцов меди, стали, титана. Кривые  $v_{id}(\epsilon)$  характеризуются существенно немонотонными зависимостями от деформации и также демонстрируют значительную зависимость от скорости деформирования. При этом отметим качественное отличие зависимости от скорости деформирования для образцов Ti с ГПУ-решеткой.

Таким образом, результаты одновременного контроля изменения  $\sigma(\epsilon)$ ,  $T(\epsilon)$  и  $v_{id}(\epsilon)$ , представленные на рис. 3, позволяют выполнить на основании соотношений (5)–(7) анализ энергетического баланса в процессе деформирования материалов с учетом затрат работы внешних сил как на изменение объема, так и на сдвиговые деформации. На рис. 4–6 приведены результаты такого анализа для исследованных металлов.

На рис. 4–6,  $a$  представлены зависимости доли тепловыделения и латентной энергии для образцов меди, стали и титана, полученные при традиционном анализе энергетического баланса ( $Q/W + L/W = 1$ ). Для всех испытанных металлов результаты традиционного анализа характеризуются достаточно гладкими кривыми роста тепловыделения и уменьшения латентной энергии в зависимости от деформаций а также наблюдается влияние скорости деформирования на эти зависимости.

Более информативная картина наблюдается по результатам анализа энергетического баланса с учетом затрат работы внешних сил на изменения объема и сдвиговые деформации.

На рис. 4, 5, 6,  $b$  приведены зависимости доли латентной энергии вследствие изменения объема ( $Lv/W$ ) и сдвиговых деформаций ( $Ls/W$ ) для трех исследованных металлов.

Наблюдается не монотонный характер изменения латентной энергии и качественное различие изменения доли латентной энергии вследствие изменения объема и сдвиговых деформаций. С увеличением деформации  $Lv/W$  растет, а  $Ls/W$  уменьшается.

Такой характер изменений зависимостей  $Lv/W$  и  $Ls/W$  определяется изменением коэффициента поперечных деформаций. Конкуренция процессов изменения объема и развития сдвиговых деформаций обусловлены перестройкой микроструктуры.

Отметим, что уменьшение суммарной латентной энергии ( $L/W = Lv/W + Ls/W$ ) обусловлено преимущественным вкладом сдвиговых деформаций для всех исследованных металлов. Также следует отметить существенное различие влияния скорости деформирования для разных металлов.

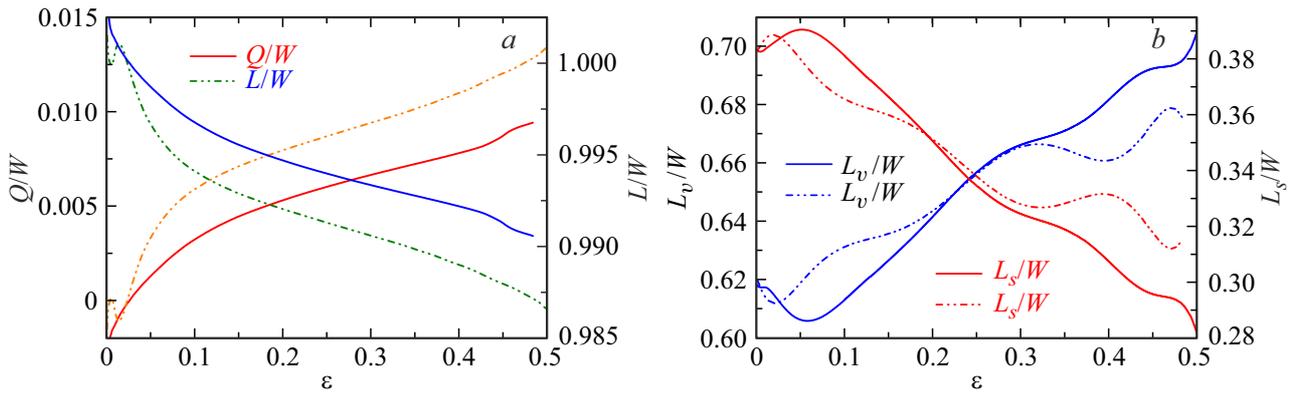


Рис. 4. *a* — зависимости доли тепловыделения  $Q/W$  и латентной энергии  $L/W$ ; *b* — зависимости  $L_v/W$  и  $L_s/W$  в меди.

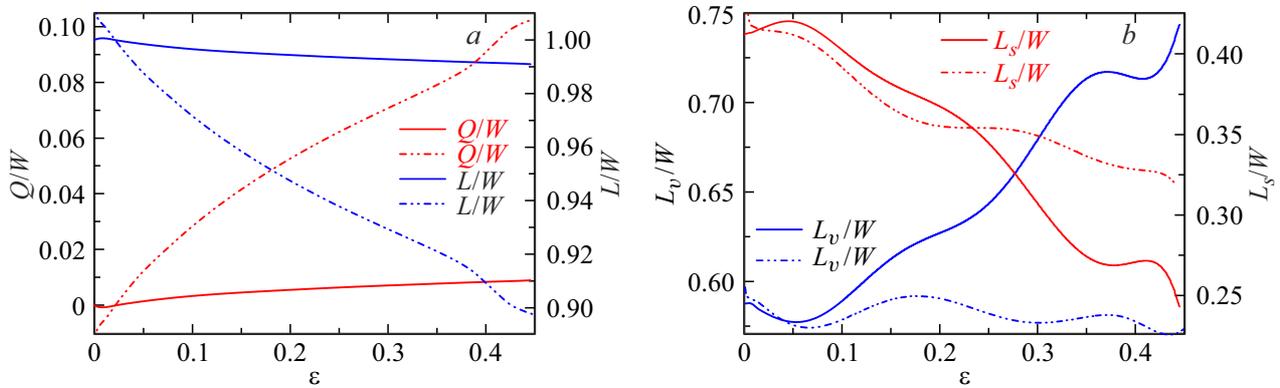


Рис. 5. *a* — зависимости доли тепловыделения и латентной энергии  $L/W$ ; *b* — зависимости  $L_v/W$  и  $L_s/W$  в стали.

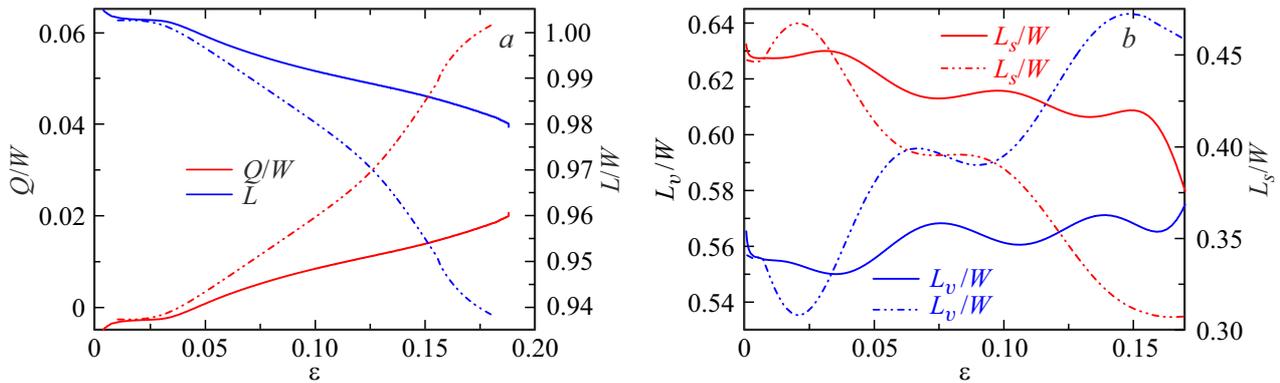


Рис. 6. *a* — зависимости доли тепловыделения  $Q/W$  и латентной энергии  $L/W$ ; *b* — зависимости  $L_v/W$  и  $L_s/W$  в титане.

Связь коэффициента поперечных деформаций с нелинейным параметром Грюнайзена (2), или с модулями жесткости (3), определяет изменение соотношения центральных и тангенциальных сил взаимодействия ( $E/G$ ) структурных элементов, что и определяет перестройку микроструктуры в процессе деформирования. При этом взаимное влияние изменения микроструктуры и соотношения центральных и тангенциальных сил взаимодействия структурных элементов очевидна.

Подобная взаимосвязь прослеживается и в модели Берлина, Ротенберга [21] при анализе механического поведения случайно упакованных сфер, взаимодействующих друг с другом двумя типами сил — нормальных к плоскости контакта и тангенциальных, пропорциональных соответствующим смещениям от положения равновесия —  $F_n = K_n \delta_n$  и  $F_t = K_t \delta_t$ . Было показано, что  $\nu_{td}$  таких тел зависит от отношения  $\lambda = K_t/K_n$  и равен  $\nu_{td} = 1 - \lambda/4 + \lambda$ .

## 4. Заключение

Таким образом, представленная методика одновременного контроля тепловыделения и изменений коэффициента поперечных деформаций позволяет получать значительную информацию на основе анализа энергетического баланса в процессе деформирования твердых тел.

Полученные результаты демонстрируют определяющий вклад сдвиговых деформаций в пластическое течение металлов, а также содержат информацию об этапах этого процесса.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Г. Лейбфрид, В. Людвиг. Теория ангармонических эффектов в кристаллах. ИЛ, М. (1963). 229 с.
- [2] Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. Мир, М. (1973). Т. 2, 422 с.
- [3] К.Л. Леонтьев. Акуст. журн. **27**, 4, 554 (1981).
- [4] В.Н. Беломестных, Е.П. Теслева. ЖТФ **74**, 8, 140 (2004).
- [5] Д.С. Сандитов. ФТГ **6**, 224 (2022).
- [6] И.И. Черкасов. ЖТФ **11**, 1834 (1952).
- [7] В.А. Кузьменко. Развитие представлений о процессе деформирования материалов. НИИТИ, Киев (1968).
- [8] В.А. Кузьменко. Проблемы прочности **3**, 97 (1969).
- [9] В.И. Трефилов, В.Ф. Моисеев, Э.П. Печковский. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. Наук. думка, Киев (1987). 236 с.
- [10] В.Е. Панин. Физ. мезомеханика **1**, 5 (1998).
- [11] Н.А. Конева, Э.В. Козлов. В сб.: Структурные уровни пластической деформации и разрушения / Под ред. акад. В.Е. Панина. Наука, Новосибирск (1990). С. 123.
- [12] В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. Структурные уровни деформации твердых тел. Наука, Новосибирск (1985). С. 22.
- [13] Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, А. Хиката. Ультразвуковые методы исследования пластической деформации Мир, М. (1969), 307 с.
- [14] В.Э. Гусев, А.А. Карабутов. Лазерная оптоакустика. Наука, М. (1991). 304 с.
- [15] Ю.В. Судьенков, И.В. Смирнов. Устройство для определения и контроля скоростей поверхностных и продольных акустических волн в материалах при квазистатических и циклических нагрузках. Патент на изобретение № 2652520 с1, 26.04.2018. Заявка от 28.12.2016.
- [16] Б.А. Зимин, И.В. Смирнов, Ю.В. Судьенков. Докл. РАН, **474**, 4, 1 (2017).
- [17] В.А. Кузьменко. Новые схемы деформирования твердых тел. Наук. думка, Киев (1973). 200 с.
- [18] В. Прагер. Проблемы теории пластичности. Физматгиз, М. (1958). 136 с.
- [19] Л.М. Качанов. Основы теории пластичности. Наука, М. (1969). 420 с.
- [20] Б.А. Зимин, В.Е. Свентицкая, И.В. Смирнов, Ю.В. Судьенков. ФТГ **60**, 4, 754 (2018).
- [21] Ал.Ал. Берлин, Л. Ротенберг, Р. Басэрт. Высокомолекуляр. соединения **Т(А)** **34**, 1 (1992).

*Редактор Т.Н. Василевская*