

УДК 621.7

ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Асп. МОЙСЕЙЧИК А. Е., докт. физ.-мат. наук, проф. ВАСИЛЕВИЧ Ю. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: vasilevich@bsu.by

Целью настоящей статьи является установление зависимости между теплообразованием и сопротивлением деформированию конструкционной стали. На основании приведенных данных допущено, что при упругопластическом деформировании конструкционной стали теплообразование и повышение температуры поверхности изделия являются результатом физико-химического взаимодействия дислокаций и атомов примесей в полосах скольжения. Взаимозависимость теплообразования и упругопластического деформирования экспериментально подтверждена в серии экспериментов по растяжению пластин из низкоуглеродистой стали. В процессе деформирования интенсивность и скорость деформаций – основные факторы, определяющие локальный разогрев материала в очаге предразрушения, а температура напрямую влияет на скорость протекания диффузионных процессов и изменение физико-механических характеристик материала в зоне предразрушения. Согласно проведенным экспериментам, для низкоуглеродистой стали ВСтЗсп при квазистатическом растяжении средняя температура разогрева зоны предразрушения составляет примерно 20–90 °С. Приведены данные процесса деформации стальных пластин, свидетельствующие о том, что упругопластическое деформирование сопровождается деформационным теплообразованием, а зарождение трещины является термомеханическим процессом. Теплота образуется в полосах сдвига, направление которых соответствует наибольшим сдвигающим напряжениям. Температура поверхности в зоне зарождения трещины достигала в стадии долома 88 °С.

С использованием понятия «поверхностная энергия» и формулы Лапласа выведена формула Давиденкова – Спиридоновой, определяющая сопротивление деформированию растянутого круглого стального стержня в стадии образования шейки, показана ее зависимость от деформационного теплообразования.

Ключевые слова: теплообразование, сопротивление деформированию, конструкционная сталь, эффекты люминесценции.

Ил. 3. Библиогр.: 12 назв.

HEAT GENERATION AND RESISTANCE TO DEFORMATION OF STRUCTURAL STEEL

MOYSEYCHIK A. E., VASILEVICH Yu. V.

Belarusian National Technical University

The purpose of this paper is to determine dependence between heat generation and resistance to deformation of structural steel. It has been assumed on the basis of the represented data that in the course of deformation of structural steel physico-chemical interactions of dislocations and impurity atoms occurring in the slip bands result in heat generation and temperature increase of product surface. Interdependence of heat generation and elastic-plastic deformation has been experimentally proved by set of experiments on low-carbon steel plate extension. In the case of deformation its intensity and rate are considered as main factors that determine local material heating in the pre-fracture nucleus and temperature directly exerts its influence on diffusion processes and changes in physical and mechanical characteristics of the material in the pre-fracture nucleus. The obtained average heating temperature for the pre-fracture nucleus is equal approximately 20–90 °C for low-carbon steel ВСтЗсп while using quasi-static extension. The paper presents data pertaining to steel plate deformation that point to the fact that elastic-plastic deformation is accompanied by deformation heat generation and a crack initiation is caused by thermo mechanical process. Heat is formed in the slip bands and their direction corresponds to the maximum shearing stresses. Surface temperature in the zone of crack initiation has reached 88 °C in the pre-fracture stage.

The Davidenkov – Spiridonova formula has been derived while using a concept of “surface energy” and Laplace's formula. This formula makes it possible to determine resistance to deformation of a stretched round steel rod in the stage of neck formation. The paper shows formula's dependence on the deformation heat generation.

Keywords: heat generation, deformation resistance, structural steel, luminescence effects.

Fig. 3. Ref.: 12 titles.

Введение. Экспериментально доказано, что деформирование конструкционных сталей происходит с охлаждением или нагревом рабочих объемов материала [1]. При этом в результате деформаций различной природы активация процессов рождения, взаимодействия и аннигиляции дефектов внутри материала сопровождается эмиссией частиц и света (электронов, ионов, атомов, кластеров и фотонов) [2]. Эффекты люминесценции проявляются и при других воздействиях на металлы, при которых развивается быстропротекающее искажение кристаллической решетки [2, 3]. В результате теплопроводности происходит соответствующее изменение температуры поверхности деформируемого изделия, что позволяет по данным измерения поверхностной температуры изделия эффективно контролировать процесс зарождения и развития дефектов в опасных объемах изделия [4]. С использованием метода пузырьков О. В. Клявин в [5] выявил особенности элементарных актов деформирования в кристаллах при криогенных температурах и подтвердил микронеоднородность процесса деформирования и наличие локального нагрева в полосах скольжения кристаллов. Автор [5] пришел к следующим выводам. Во всех опытах время начала появления пузырьков совпадало с диаграммным пределом текучести образцов. Суммарная энергия дислокаций в полосах, вышедших на поверхность кристалла, примерно на четыре порядка меньше работы, затраченной на образование самой полосы скольжения и выделяемой в основном в виде теплоты. Нагретыми областями кристалла являлись винтовые и краевые полосы скольжения, а также места пересечения обоих типов полос. Непрерывное выделение пузырьков гелия в [5] наблюдалось в местах пересечения краевых полос скольжения, где возникали и раскрывались микротрещины. На винтовых полосах скольжения отмечено большее количество пузырьков [5], чем на краевых. На краевых полосах скольжения пузырьки имели меньшие размеры, образовывались рядами по несколько штук под углом 45° к оси образца и в месте зарождения не задерживались и всплывали после возникновения. Расположение пузырьков проявляет функционирующие полосы скольжения как источники теплообразования в кристаллах.

Целью исследований авторов статьи являлось установление зависимости между теплообразованием и сопротивлением деформированию конструкционной стали. При упругом растяжении стального изделия температура на поверхности понижается, а при сжатии повышается. Из термодинамических процессов для упругой стадии работы материалов получено, что изменение температуры при деформировании пропорционально соответствующему изменению первого инварианта тензора напряжений [6]

$$\Delta\sigma = -\frac{\Delta T}{TK_m}, \quad (1)$$

где ΔT – изменение поверхностной температуры изделия при упругом деформировании; $\Delta\sigma$ – то же суммы главных напряжений; T – температура материала; K_m – экспериментально определяемый коэффициент пропорциональности.

Экспериментальная проверка формулы (1), выполненная авторами [7] с использованием термографирования, тензометрирования и конечно-элементного расчета, показала хорошую сходимость результатов. Для низкоуглеродистой стали $K_m = 3,32 \cdot 10^{-6}$ МПа [7].

Изложенное выше и данные экспериментов [8] позволяют допускать, что при упруго-пластическом деформировании конструкционной стали теплообразование и повышение температуры поверхности изделия являются результатом физико-химического взаимодействия дислокаций и атомов примесей в полосах скольжения. Взаимозависимость теплообразования и упругопластического деформирования экспериментально подтверждена авторами данной статьи в серии экспериментов по растяжению пластин из низкоуглеродистой стали ВСтЗсп толщиной 6–18 мм с боковыми парными надрезами. Начальную кривизну в основании надреза задавали 3,4 и 5,0 мм. Образцы квазистатически нагружали на испытательной машине Р-100 с записью диаграммы «нагрузка – удлинение». Процесс деформирования образцов отображался в термофильме с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000». Обработку результатов выполняли в программном пакете IRTIS. Кадры термофильма загрузки одного из таких образцов, свидетельствующие о том, что упругопластическое деформирование сопровождается деформаци-

онным теплообразованием, а зарождение трещины является термомеханическим процессом, показаны на рис. 1. Теплота образуется в полосах сдвига, направление которых соответствует наибольшим сдвигающим напряжениям. Температура поверхности в зоне зарождения трещины достигала в стадии долома 88 °С.

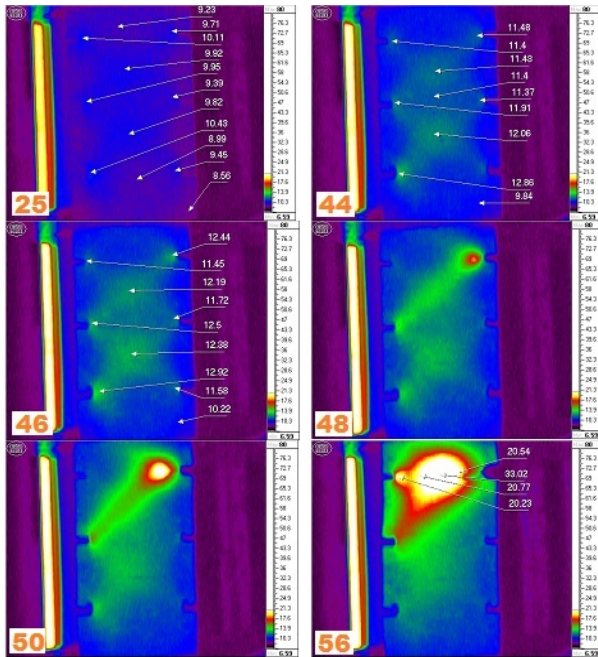


Рис. 1. Кадры термофильма растяжения образца № 13.9:
 кадр 25: $T_{\max} = 20,13\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\min} = 7,13\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\theta = 76,82\text{ с}$;
 кадр 44: $13,01\text{ }^{\circ}\text{C}$; $7,40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $102,4\text{ с}$;
 кадр 46: $13,43\text{ }^{\circ}\text{C}$; $7,42\text{ }^{\circ}\text{C}$; $107,0\text{ с}$;
 кадр 48: $20,97\text{ }^{\circ}\text{C}$; $7,01\text{ }^{\circ}\text{C}$; $111,7\text{ с}$;
 кадр 50: $23,46\text{ }^{\circ}\text{C}$; $7,45\text{ }^{\circ}\text{C}$; $116,4\text{ с}$;
 кадр 56: $33,57\text{ }^{\circ}\text{C}$; $7,52\text{ }^{\circ}\text{C}$; $130,3\text{ с}$

Моделирование сопротивления деформированию феррито-перлитной стали. Условно выделим перлитное зерно, состоящее из чередующихся полосок цементита толщиной Δ_c и полосок феррита толщиной Δ_f . При этом $\Delta_c + \Delta_f = \Delta_p$ – межпластинчатое расстояние. Используя принцип аддитивности, несложно получить, что такое зерно проявит сопротивление деформированию в соответствии с выражением

$$\sigma_p = \frac{\sigma_c}{\Delta_p} \left[1 - (1 - \Delta_p) \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right], \quad (2)$$

где σ_p , σ_f , σ_c – сопротивление деформированию перлита, феррита и цементита.

Далее рассмотрим участок феррито-перлитной стали площадью

$$A_s = A_p + A_f = n_p A_s + n_f A_s = n_p A_s + (1 - n_p) A_s,$$

которая формируется зернами перлита ($n_p A_s$) и феррита ($(1 - n_p) A_s$). С учетом (2) этот участок будет оказывать сопротивление деформированию:

$$\sigma_s = \sigma_p n_p \left[1 + \left(\frac{1}{n_p} - 1 \right) \frac{\sigma_f}{\sigma_p} \right] = \frac{\sigma_c n_p}{\Delta_p} \left[1 - (1 - \Delta_p) \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right] \left[1 + \left(\frac{1}{n_p} - 1 \right) \frac{\sigma_f}{\sigma_p} \right]. \quad (3)$$

Если в зоне расположения феррито-перлитного участка в процессе пластической деформации произойдет местный деформационный нагрев стали от температуры T_0 до $T = T_0 + \Delta T$ и такой нагрев будет действовать достаточно долгое время, то появится возможность для изменения величины Δ_p .

Изменение размера Δ_p перлитной частицы вследствие диффузии можно в первом приближении представить выражением

$$\Delta_p = m D^{1/2} m A^{1/2} e^{-Q/2RT}, \quad (4)$$

где m , D , A , Q , R , T – соответственно постоянная, коэффициент диффузии $\left(D = A e^{-\frac{Q}{RT}} \right)$,

константа диффузии, теплота диффузии (высота потенциального барьера, который должен преодолеть атом при переходе из одного положения равновесия в решетке в другое), универсальная газовая постоянная, абсолютная температура в объеме, где протекает диффузия.

Выражение (3) с учетом (4) можно представить в виде

$$\sigma_s = \sigma_c n_p \frac{e^{\frac{Q}{2RT}}}{m A^{\frac{1}{2}}} \left[1 - \left(1 - m A^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{Q}{2RT}} \right) \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right] \times \left[1 + \left(\frac{1}{n_p} - 1 \right) \frac{\sigma_f}{\sigma_p} \right]. \quad (5)$$

Формулу (5) приближенно запишем в виде суммы

$$\sigma_s = \sigma_{\text{атерм}} + \sigma_{\text{терм}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{атерм}}$ – объединяет относительно слабо зависящие от температуры слагаемые (5); $\sigma_{\text{терм}}$ – объединяет остальные слагаемые (5).

Выражения (2)–(5) имеют вполне ясный физический смысл. Сопоставление (5) с ранее полученными другими авторами [9] на основании экспериментальных данных эмпирическими и полуэмпирическими (с привлечением дислокационных механизмов пластичности) формулами для напряжений кривых течения разных материалов показывает, что при этом в неявном виде в формулы закладывалось описание структурных и диффузионных эффектов, проявляющихся при пластическом течении. На это указывает и форма представления полуэмпирических уравнений в виде произведения составляющих, учитывающих вклады интенсивности деформаций, скорости деформаций и температуры, подмеченная в [9]. При этом надо учитывать, что интенсивность и скорость деформаций являются основными факторами, определяющими локальный разогрев материала в очаге предразрушения, а температура напрямую влияет на скорость протекания диффузионных процессов и изменение физико-механических характеристик материала в зоне предразрушения. Установленная в экспериментах автора для низкоуглеродистой стали ВСт3сп при квазистатическом растяжении средняя температура разогрева зоны предразрушения составляет примерно 20–90 °С. В очагах нагрева температура материала увеличивается до значительно более высоких величин (вплоть до температуры плавления) [3, 5]. Влияние разогрева на процессы деформирования и зарождения разрушения надо разделить на две стадии. На первой стадии пластического течения и подъема температуры вследствие физико-химических изменений в этой зоне протекают в основном диффузионные процессы, развивается пластичность по дислокационно-диффузионным механизмам, нарушается сплошность материала и образуются микродефекты. Это происходит в зоне максимальных температур, у надрезов. Образовавшиеся на первой стадии свободные поверхности (полости, трещины) медленно подрастают на второй стадии. Несложно допустить, что на этой стадии к де-

формациям растяжения (ε_e) от внешних сил добавляются тепловые деформации того же знака (ε_t). Под действием суммарной термомеханической деформации ($\varepsilon_e + \varepsilon_t$) происходят формирование начальной трещины и ее рост до критической величины.

Об учете поверхностной энергии при выводе формулы Давиденкова – Спиридоновой. Н. Н. Давиденков и Н. И. Спиридонова в [10] получили выражение для коэффициента $K_{\text{ш}}$, выражающего локальное повышение напряжений при образовании шейки в цилиндрическом образце (рис. 2) в виде

$$K_{\text{ш}} = 1 + \frac{a}{4R}. \quad (7)$$

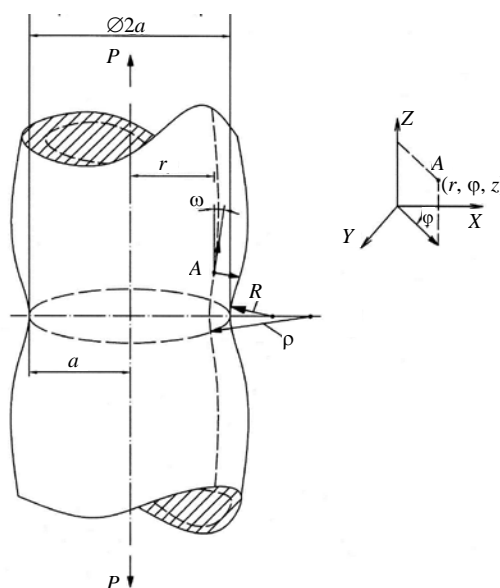


Рис. 2. Профиль шейки

Следует заметить, что коэффициент получен с использованием экспериментальных данных, позволивших авторам [10] обосновать три предположения, положенных в основу вывода.

1. «Деформация зерен в радиальном и тангенциальном направлениях практически одинакова, а следовательно... равны и соответствующие напряжения».

2. «Деформация не изменяется также и при переходе от зоны к зоне, т. е. одинакова по всему сечению образца (для данного этапа развития шейки), а следовательно, одинаковы и эффективные напряжения (этим именем мы назы-

ваем разность главных напряжений, которая оказывается виновницей пластической деформации по гипотезам как максимальных, так и октаэдрических касательных напряжений»).

3. «Рассматривая образующую поверхность шейки как траекторию главных напряжений на контуре, заметим, что кривизна этих траекторий должна постепенно уменьшаться, достигая нуля на оси образца».

Далее авторы [10] посредством рассуждений и экспериментальной проверки приходят к выводу, что «кривизна пропорциональна x и может быть представлена формулой»

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x}{aR},$$

где a – радиус сечения шейки; ρ – радиус кривизны в сечении, нормальном к оси стержня; R – радиус кривизны ее контура в меридиальном сечении; $x = r$ – расстояние от оси образца до текущего внутреннего криволинейного слоя (a, ρ, R показаны на рис. 2).

Заметим, что авторы [10] для обоснования введенных предположений использовали экспериментальные данные, полученные на круглых образцах диаметрами 25,0–25,1 мм. Учитывая допущения [10], вырежем на расстоянии x от оси образца (рис. 2) элемент поверхности (рис. 3) и, рассмотрев равенство нулю суммы проекций всех сил на ось « $m-t$ », получим формулу Лапласа (8):

$$\frac{\sigma_t}{\rho_t} - \frac{\sigma_m}{\rho_m} = \frac{p}{h}, \quad (8)$$

где $\frac{d\alpha_m}{ds_2} = \frac{1}{\rho_m}$; $\frac{d\alpha_t}{ds_1} = \frac{1}{\rho_t}$ – кривизна поверхности в меридиональном и тангенциальном направлениях; σ_m, σ_t – напряжение в меридиональном и тангенциальном направлениях; p – внешняя распределенная нагрузка.

Пусть $h \rightarrow 0$. Тогда вместо h и p получим dx и dp , а вместо σ_t и σ_m имеем соответствующие поверхностные натяжения P_t и P_m . Формула примет вид для поверхностных натяжений

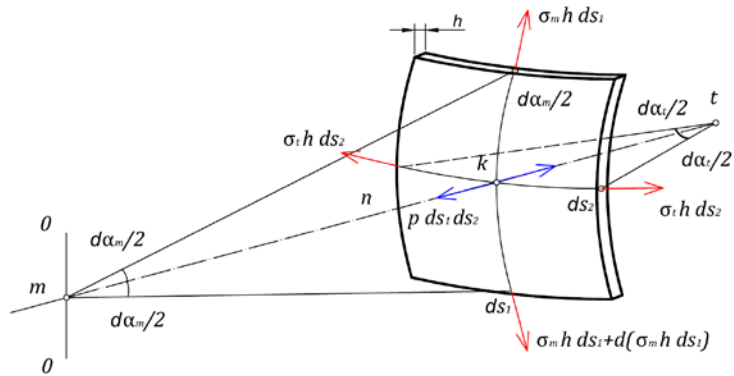


Рис. 3. К выводу формулы Лапласа

$$\frac{P_t ds_2}{\rho_t} - \frac{P_m ds_1}{\rho_m} = dp. \quad (9)$$

Преобразуем (9) с учетом теоремы о среднем

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx} &= \frac{P_t ds_2}{\rho_t} - \frac{P_m ds_1}{\rho_m} = \frac{P_t ds_2 \rho_m - P_t ds_2 \rho_m}{\rho_t \rho_m} = \\ &= \frac{(P_t - P_m)}{\rho_t \rho_m} dSx. \end{aligned} \quad (10)$$

Примем, $P_m - P_t = P_0$ и введем обозначения $a = \rho_t, R = \rho_m$. Тогда можно определить радиальные напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_r = \sigma_t &= \int_x^a \frac{P_m - P_t}{2aR} dSx = \\ &= P_0 \int_x^a \frac{x dx}{2aR} = \frac{\sigma_0 (a^2 - x^2)}{2aR}. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда

$$\sigma_m = \sigma_r + \sigma_0 = \sigma_0 \left(1 + \frac{a^2 - x^2}{2aR} \right).$$

Растягивающее стержень усилие получаем интегрированием

$$\begin{aligned} F &= \int_0^a \sigma_0 \left(1 + \frac{a^2 - x^2}{2aR} \right) 2\pi x dx = \\ &= \pi a^2 \sigma_0 \left(1 + \frac{a}{4R} \right) = \bar{\sigma} \pi a^2, \end{aligned}$$

откуда

$$\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} = 1 + \frac{a}{4R} = K_{ш}. \quad (12)$$

При образовании шейки происходит резкое повышение температуры в ослабленном сечении [11, 12]. Можно допускать, что ответственным за такое повышение является слагаемое σ_0 в (12), зависимость которого от температуры изменяется по выражению (7).

ВЫВОДЫ

1. Сопротивление деформированию конструкционной стали в зоне местного деформационного нагрева зависит как от величины такого нагрева, так и от времени его протекания.

2. Формула Давиденкова – Спиридоновой, определяющая сопротивление деформированию растянутого круглого стального стержня в стадии образования шейки, впервые выведена с использованием понятия «поверхностная энергия» и формулы Лапласа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов / С. И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1961. – Т. 2: Физико-химическая теория пластичности. – 416 с.
2. Эмиссионные процессы, сопровождающие деформирование и разрушение металлов / К. Б. Абрамова [и др.] // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41, вып. 5. – С. 842–843.
3. Хайнике, Г. Трибохимия / Г. Хайнике. – М.: Мир, 1987. – 584 с.
4. Будадин, О. Н. Тепловой контроль / О. Н. Будадин, В. П. Вавилов, Е. В. Абрамова. – М.: ИД «Спектр», 2011. – 171 с.
5. Клявин, О. В. Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах / О. В. Клявин. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
6. Thomson, W. On the Thermoelastic and Thermomagnetic Properties of Matter / W. Thomson // *Quart. J. of Math.* – 1857. – No 1. – P. 57–77.
7. Horvath, L. Experimentelle Untersuchungen der im Stahlbau Typischen Bauteile mit Thermovision: Dissertation zu Erlangung des Akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs / L. Horvath. – Cottbus: BTU, 2002. – 84 p.
8. Мойсейчик, Е. А. Исследование теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом / Е. А. Мойсейчик // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – № 1. – С. 134–142.
9. Залого, В. А. О выборе уравнения состояния обрабатываемого материала для моделирования процесса резания методом конечных элементов / В. А. Залого, Д. В. Криворучко, С. Н. Хвостик // *Вісник СумДУ.* – 2006. – № 12 (96). – С. 101–115.
10. Давиденков, Н. Н. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца / Н. Н. Давиденков,

Н. И. Спиридонова // Заводская лаборатория. – 1945. – № 6. – С. 583–593.

11. Testing the Tensile Features of Steel Specimens by Thermography and Conventional Methods / M. Kutin [et al.] // *Scientific Technical Review.* – 2010. – Vol. 60, No 1. – P. 66–70.

12. Лукин, Е. С. Исследование предельного состояния конструкционных сталей по термопластическому эффекту: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Е. С. Лукин. – Якутск, 2005. – 23 с.

REFERENCES

1. Gubkin, S. I. (1961) *Metal Plastic Deformation. Vol. 2: Physico-Chemical Theory of Plasticity.* Moscow, Metallurgizdat. 416 p. (in Russian).
2. Abramova, K. B., Shherbakov, I. P., Rusakov, A. I., & Semenov, A. A. (1999) Emission Processes, Accompanying Metal Deformation and Destruction. *Fizika Tverdogo Tela [Solid-State Physics]*, 41 (5), 842–843 (in Russian).
3. Hainike, G. (1987) *Tribochemistry.* Moscow, Mir. 584 p. (in Russian).
4. Budadin, O. N., Vavilov, V. P., & Abramova, E. V. (2011) *Heat Control.* Moscow, Spektr. 171 p. (in Russian).
5. Kliavin, O. V. (1987) *Physics of Crystal Plasticity at Helium Temperatures.* Moscow, Nauka. 256 p. (in Russian).
6. Thomson, W. (1857) On the Thermoelastic and Thermomagnetic Properties of Matter. *Quart. J. of Math.*, 1, 57–77.
7. Horvath, L. (2002) *Experimentelle Untersuchungen der im Stahlbau Typischen Bauteile mit Thermovision. Dissertation zu Erlangung des Akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs* [Experimental Investigations of the Typical Components in Steel Construction with Thermal Vision. Dissertation Doctor Engineer]. Cottbus. 84 p. (German).
8. Moiseyevich, E. A. (2013) Investigations on Heat Generation and Fracture Initiation in Steel Expanded Plate with Design and Technological Defect. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika [Applied Mechanics and Technical Physics]*, 1, 134–142 (in Russian).
9. Zaloga, V. A., Krivoruchko, D. V., & Khvostik, S. N. (2006) On Selection of Equation for State of Material to be Machined in Order to Simulate Cutting Process While Using Finite Elements Method. *Visnik SumDU [Bulletin of Sumy State University]*, 12 (96), 101–115 (in Russian).
10. Davidenkov, N. N., & Spiridonova, N. I. (1945) Analysis of Stress State in Expanded Specimen Neck. *Zavodskaya Laboratoria [Plant Laboratory]*, 6, 583–593 (in Russian).
11. Kutin, M., Ristić, S., Burzić, Z., & Puharić, M. (2010) Testing the Tensile Features of Steel Specimens by Thermography and Conventional Methods. *Scientific Technical Review*, 60 (1), 66–70.
12. Lukin, E. S. (2005) *Investigations on Limit State of Structural Steel According to Thermoplastic Effect. Author's Abstract of PhD Thesis Research.* Yakutsk, Institute of Physico-Engineering Problems of the North of the Siberian Division of RAS. 23 p. (in Russian).

Поступила 16.01.2015