

Е. Е. Абашкин, А. В. Ткачева

РАЗУПРОЧНЕНИЕ МАТЕРИАЛА СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ВСЛЕДСТВИЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Аннотация. В работе описываются исследования теплового воздействия горячего газа ацетиленовой горелки на стальную пластину. В ходе данного воздействия в материале пластины появляется пластическое течение, которое порождает необратимые деформации, влияющие на понижение предела текучести материала. Разупрочнение материала пластины устанавливается опытным путем в ходе серии экспериментов. Для описания физической модели разупрочнения стальной пластины вследствие температурного воздействия строится одномерная математическая модель, основанная на модели Прандтля-Рейса. Предел текучести и упругие модули принимаем зависимыми от температуры. В качестве критерия пластического течения принимается условие Ишлинского-Ивлева, в котором введено слагаемое, отвечающее за упрочнение материала.

Ключевые слова: температурные напряжения, точечный нагрев, остаточные напряжения, упругость, пластичность, упрочнение, условие Ишлинского-Ивлева

DOI: 10.26293/chgru.2019.41.3.006

УДК: 539.374

Введение

Довольно часто в научной литературе, посвященной обработке металлов давлением, встречается утверждения авторов о том, что материал может упрочняться и разупрочняться в ходе механического воздействия [1–4]. При повышении температуры до момента рекристаллизации в стальной пластине происходят фазовые переходы, которые изменяют физико-механические характеристики [1], [6], а именно: упругие модули и предел текучести. Если предел текучести в процессе деформирования увеличивается, то говорят об упрочнении металла, если уменьшается – о разупрочнении. Подвергая стальную пластину точечному (локальному) нагреву, исходящему от пламени

© Абашкин Е. Е., Ткачева А. В., 2019

Абашкин Евгений Евгеньевич

e-mail: abashkine@mail.ru, младший научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия,

Ткачева Анастасия Валерьевна

e-mail: 4nansi4@mail.ru, старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия,

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00414-19-00.

Поступила 01.08.2019

горючих газов ацетиленовой горелки, нами было зафиксировано падение предела текучести более чем на 20%, то есть произошло разупрочнение стальной пластины. Хотя сталь 45, из которой была изготовлена пластина, склонна к самозакаливанию. Этот факт представляет особый интерес для инженеров – проектировщиков металлических конструкций, которые могут подвергнуться температурному воздействию и потерять свою несущую способность. По температурному деформированию пластин написано много работ [7–13]. Рост публикаций пришелся на развитие компьютерной техники. В основном это связано с возможностью производить вычисления, однако есть публикации с середины прошлого века [9–13]. Ни в одной из них авторы не приводят сравнения расчетных данных полученных вычислений с экспериментальными данными. Для полноты описания разупрочнения, происходящего в стальной пластине, в настоящей работе построена математическая модель точечного нагрева разупрочняющейся пластины. Полученные благодаря математическому моделированию остаточные напряжения сравниваются с остаточными напряжениями нагретой ацетиленовой горелкой стальной пластины, снятыми с ее поверхности при помощи RIGAKU MSF-3M анализатора остаточных напряжений.

2. Основы математической модели.

В качестве основы математической модели принимаем модель Прандтля-Рейса, в которой деформации полагаются малыми и складывающимися из обратимых e_{ij}^e и необратимых e_{ij}^p

$$d_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^p = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (1)$$

где $u_{i,j}$ – компоненты вектора перемещений, d_{ij} – компоненты тензора полной деформации. Обратимые деформации связаны с напряжениями σ_{ij} и температурой T законом Дюамеля-Неймана [14]

$$\sigma_{ij} = (\lambda e_{kk}^e - 3\alpha K(T - T_0)) \delta_{ij} + 2\mu e_{ij}^e, \quad (2)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, T , T_0 – текущая и начальная температура, λ , μ , K – упругие модули, μ – модуль сдвига G , $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ – модуль всестороннего сжатия.

Необратимые деформации развиваются, если напряженное состояние достигнет поверхности нагружения, об этом гласит ассоциированный закон пластического течения [15]

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{de_{ij}^p}{dt} = d\xi \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}; \quad d\xi > 0; \quad f(\sigma_{ij}) = 0, \quad (3)$$

где $f(\sigma_{kl}, \zeta, k) = 0$ – уравнение поверхности нагружения в пространстве напряжений, k – предел текучести материала, ζ – коэффициент упрочнения.

В качестве возникновения пластического течения воспользуемся кусочно-линейным пластическим потенциалом – условием максимальных приведенных напряжений (условием Ишлинского-Ивлева) [16]

$$\max |\sigma_i - \zeta e_i^p - \sigma| - \frac{4}{3}k = 0, \quad \sigma = \frac{1}{3}\sigma_{jj}. \quad (4)$$

Распределение температуры задается законом теплопроводности [17]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a T_{,jj} - \chi(T - T_0), \quad (5)$$

где a – коэффициент теплопроводности, χ – коэффициент теплоотдачи $\chi = 2\beta(\zeta\rho h)^{-1}$, β – теплоотдачи между деформируемого и проводящего тепло тела в окружающую среду, ζ – удельная теплоемкость на единицу массы, ρ – плотность материала

платины, h – толщина пластины. Принимая во внимание высокую температуру нагрева материала, в отличие от классического случая теории температурных напряжений, задаваемой зависимостями (1) и (2), когда в них λ , μ , k постоянные величины, свяжем зависимости последних от температуры [18, 19]

$$\begin{aligned} k(T) &= k_0 (\tau)^2; \quad v(T) = 0.5 - (0.5 - v_0) \tau, \\ \lambda &= \frac{2v\mu}{1-2v}; \quad \tau = \frac{T_p - T}{T_p - T_0}, \\ \mu &= \mu_0 (-65.94 \cdot 10^{-3} T^2 + 41.08 T + 77.82 \cdot 10^3) \cdot 84000^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

В (6) k_0 , v_0 , μ_0 – предел текучести, коэффициенты Пуассона, модуль сдвига при комнатной температуре, T_p – температура плавления металла.

Завершает систему уравнений (1)–(6) уравнение равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0. \quad (7)$$

3. Постановка задачи. Упругое деформирование.

В цилиндрической системе координат (r, φ, z) расположена пластина, которая нагревается от источника тепла, расположенного в центре $r = 0$

$$T(r, t) = qt, \quad 0 \leq r \leq r_0, \quad (8)$$

где q – скорость нагрева, r_0 – радиус пятна нагрева. Когда температура в центре пластины станет равной $T(0, t_*) = 0,9T_p$, источник отводится, и материал пластины остывает. Теплоотводом от боковых поверхностей пластины пренебрегаем из-за малой толщины, которую не учитываем. Распределения температуры в материале пластины определяется из закона теплопроводности (5), записанного в цилиндрической системе координат

$$T_{,t} = a (rT_{,r})_{,r} + \chi (T_0 - T). \quad (9)$$

Поскольку решения температурной задачи (7)–(9) получить не трудно с помощью численных методов [20] или аналитически [21], останавливаться на ее решении не будем и перейдем к механической задаче.

В условиях плоского напряженного состояния ($\sigma_z = 0$) из зависимостей закона Дюамеля-Неймана имеем

$$\begin{aligned} \sigma_r &= Au_{r,r} + Br^{-1}u_r - D(T - T_0), \\ \sigma_\varphi &= Bu_{r,r} + Ar^{-1}u_r - D(T - T_0), \end{aligned} \quad (10)$$

$$A = 4\mu(\lambda + \mu)(\lambda + 2\mu)^{-1}, \quad B = 2\lambda\mu(\lambda + 2\mu)^{-1}, \quad D = 6K\mu\alpha(\lambda + 2\mu)^{-1}.$$

Подстановка (10) в уравнение равновесия

$$\sigma_{r,r} + r^{-1}(\sigma_r - \sigma_\varphi) = 0 \quad (11)$$

приводит к уравнению для вычисления перемещения u_r

$$\phi u_{r,rr} + \varsigma u_{r,r} + \omega u_r + \beta = 0, \quad (12)$$

$$\phi = A, \quad \varsigma = A_{,r} + r^{-1}A, \quad \omega = r^{-1}B_{,r} - r^{-2}A, \quad \beta = -DT_{,r} - D_{,r}(T - T_0),$$

В качестве граничных условий выбираем условия

$$u_r|_{r=0} = 0, \quad \sigma_r|_{r=R} = 0, \quad (13)$$

где R – расстояние до края пластины.

В случае учета зависимости упругих модулей от температуры, решение обыкновенного дифференциального уравнения (12) совместно с граничными условиями (13)

возможно только численно. В данной работе для численного решения применяется один из методов конечных разностей - метод сеток. Область разбивается равномерной сеткой. Для каждого узла сетки записывается в разностном виде уравнение равновесия, а на границах аппроксимируются граничные условия. Таким образом получается линейная система уравнений, которая решается методом Гаусса. Аналитическое решение при постоянных упругих модулях приведено в [22].

4. Пластическое течение

С некоторого момента времени в центре нагрева выполняется условие пластического течения $2(\sigma_z - \zeta e_z^p) - (\sigma_r - \zeta e_r^p) - (\sigma_\varphi - \zeta e_\varphi^p) = 4k$. Здесь образуется упругопластическая граница $r = n_1(t)$. В области $0 \leq r \leq n_1(t)$ материал пластины пластически течет, что приводит к образованию и развитию необратимых деформаций. Закон Дюамеля – Неймана в этом случае запишется в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= A(u_{r,r} - e_r^p) + B(r^{-1}u_r - e_\varphi^p) - D(T - T_0), \\ \sigma_\varphi &= B(u_{r,r} - e_r^p) + A(r^{-1}u_r - e_\varphi^p) - D(T - T_0).\end{aligned}\quad (14)$$

Из ассоциированного закона пластического течения (3) находим $\varepsilon_r^p = \varepsilon_\varphi^p$, $\varepsilon_\varphi^p = -\zeta$, $\varepsilon_z^p = 2\zeta$, $e_r^p = e_\varphi^p = -\zeta\tau + \tilde{e}_r^p$, $e_z^p = 2\zeta\tau + \tilde{e}_z^p$. Слагаемые $\zeta\tau$ являются приращением необратимой деформации \tilde{e}_r^p , существовавшей или зародившейся на предыдущем временном шаге, $\tau = \Delta t$ шаг по времени. Учитывая вышесказанное и (14) находим

$$\begin{aligned}\zeta &= \tilde{e}_r^p \tau^{-1} + g(D(T - T_0) - 0.5(A + B)(u_{r,r} + r^{-1}u_r) - 2k)\tau^{-1} \\ \sigma_r &= g(0.5(A^2 - B^2 + 6cA)u_{r,r} + 0.5(B^2 - A^2 + 6cB)r^{-1}u_r - \\ &\quad - g(3Dc(T - T_0) + 2(A + B)k), \\ \sigma_\varphi &= g(0.5(A^2 - B^2 + 6cA)r^{-1}u_r + 0.5(B^2 - A^2 + 6cB)u_{r,r}) - \\ &\quad - g(3Dc(T - T_0) + 2(A + B)k), \\ g &= (A + B + 3c)^{-1}.\end{aligned}\quad (15)$$

Проводя численное решение дифференциального уравнения равновесия (11) с учетом (15), на каждом временном шаге находятся перемещения $u_r(r, t)$. В области пластического течения дифференциальное уравнение равновесия строится на подобии (12). Благодаря тому, что кусочно-линейное условие пластического течения дает возможность записать дифференциальное уравнение равновесия в линейном виде, то построенная при численном решении система линейных уравнений решается так же методом Гаусса. Граничные условия на упругопластической границе в отличие от аналитических решений, задавать не стоит. О хорошей сходимости и численной устойчивости решения разностным методом можно судить в случае неразрывности напряжения σ_r на упругопластической границе.

5. Разгрузка и остаточные напряжения

После отвода тепла в центре $r = 0$ необратимые деформации замедляют свой рост, образуется разгружающая упругопластическая граница $r = m_1(t)$, продвигающаяся за границей $r = n_1(t)$. Через некоторый промежуток времени границы соединятся. В области разгрузки $0 \leq r \leq m_1(t)$ напряжения определяются из соотношений (14) с той лишь разницей, что необратимые деформации уже не растут и остаются постоянными. Упругие модули (6) сохраняют свои значения при остывании. Это предполагает фазовые переходы. Остаточные напряжения в материале пластины находятся численно из решения дифференциального уравнения равновесия (11) с уже известными необратимыми деформациями.

6. Физическое моделирование

Для проведения натурального эксперимента возьмем стальную пластину с размерами шириной 100 мм, длиной 200 мм, толщиной 12 мм. До начала эксперимента, используя метод рентгена дифрактометрии, произведем замер остаточных напряжений в материале пластины, убедимся в их малых значениях. В центре поместим источник тепла (ацетиленовую горелку) и произведем нагрев до температуры $T(0, t_*) = T_p$. После нагрева и полного остывания пластины произведем снятие остаточных напряжений (рис.1).

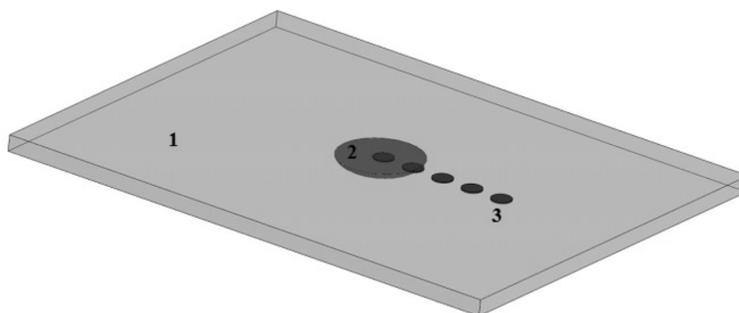


Рис. 1. Схема определения остаточных напряжений: 1 – стальная пластина; 2 – зона теплового воздействия; 3 – точки снятия данных

На рисунках 2 и 3 показаны распределения остаточных напряжений для пластин, изготовленных из различных видов стали с физико-механическими характеристиками. Для Ст3 $\rho = 7850 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, удельная теплоемкость $0,48 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$, теплопроводность $55,5 \text{ Вт} / (\text{мК})$, $k_0 = 255 \text{ МПа}$, $\mu_0 = 74000 \text{ МПа}$, $T_p = 1525^\circ\text{C}$, $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6}$, коэффициенты теплоотдачи нагретого металла в окружающую среду $7,6 \text{ Вт} / (\text{мК})$. Для Стали 45 $\rho = 7814 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, удельная теплоемкость $0,5 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$, теплопроводность $67,78 \text{ Вт} / (\text{мК})$, $\mu_0 = 78000 \text{ МПа}$, $T_p = 1525^\circ\text{C}$, $\alpha = 11,1 \cdot 10^{-6}$, коэффициенты теплоотдачи нагретого металла в окружающую среду $7,6 \text{ Вт} / (\text{мК})$. Коэффициент упрочнения s взят 2000 Па [23]. Значения остаточных напряжений, полученные экспериментально изображены точками.

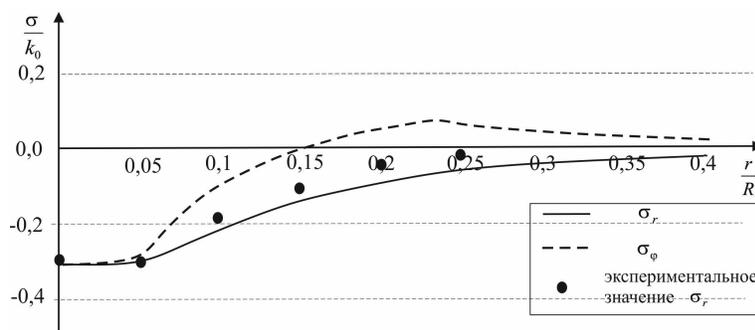


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в материале стальной пластины (Ст3)

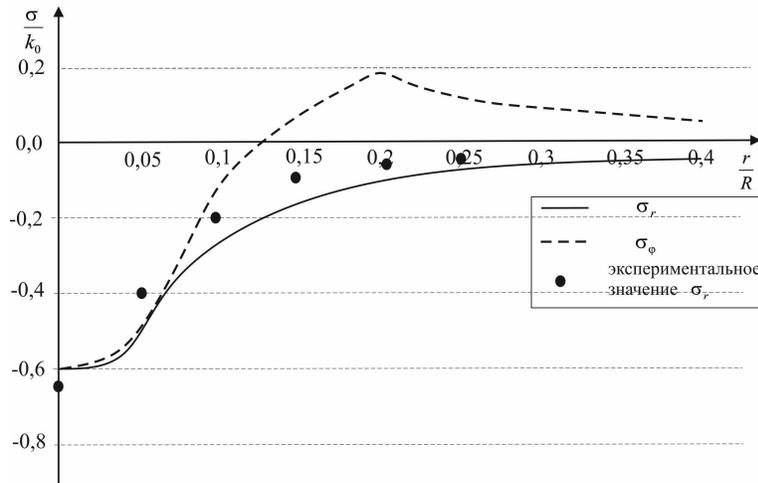


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в материале стальной пластины (Сталь 45)

Локальный нагрев оказывает влияние на структуру и физико-механические свойства материала пластины из углеродистой стали. Тепловое воздействие пламени горючих газов нагревает металл до температуры плавления в зоне контакта. При остывании в точке расплавления металла происходит его усадка. Для установления реальных размеров зоны теплового воздействия и микроструктурных изменений в металле пластины приведены металлографические шлифы образцов (рис. 4). Длина от центра зоны расплавления металла до окончания зоны термического влияния составила: для стали Ст3 – 13,5 мм, для стали 45 – 15,5 мм. Полученный результат совпадает с длиной зоны распределения больших остаточных напряжений, установленных в теоретических расчетах и экспериментально найденных значениях. Зона расплавления металла у образцов из стали марки Ст3 и 45 характеризуется феррито-перлитной структурой с укрупненным размером зерен. Размер зерна зоны расплавления металла в среднем составил 117 мкм., что в 6 раз больше размера зерна металла, не подвергшегося тепловому воздействию. Данные структурные изменения происходят из-за перегрева металла и впоследствии его быстрого охлаждения, что приводит к росту остаточных напряжений в металле. Это оказывает негативное влияние на физико-механические свойства материала пластины и приводит к его разупрочнению в зоне теплового воздействия.

Для проверки теоретических расчетов математической модели и определения влияния теплового воздействия пламени ацетиленовой горелки требуется провести опытные физико-механические испытания.

Образцы, полученные до и после теплового воздействия, подвергались испытанию на растяжение на тестовой машине. Из полученных результатов, представленных на рис. 5 видно, что величина предела текучести и прочности образцов после теплового воздействия снижается на 25 %.

7. Заключение

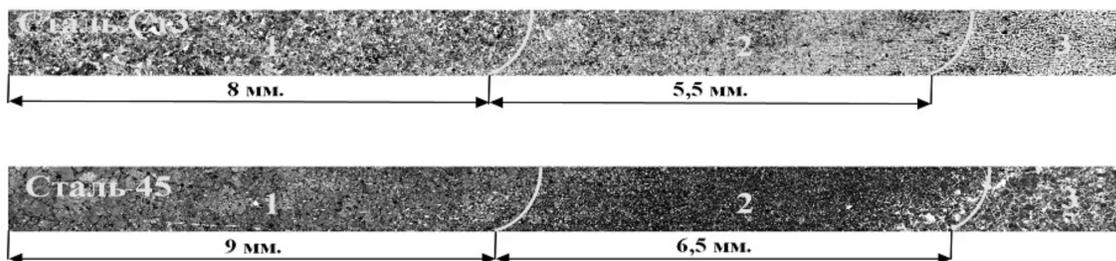


Рис. 4. Структура металла образцов, полученных после точечного теплового воздействия (x100): 1 – зона расплавления металла; 2 – зона термического влияния; 3 – зона металла не подвергшегося структурным изменениям.

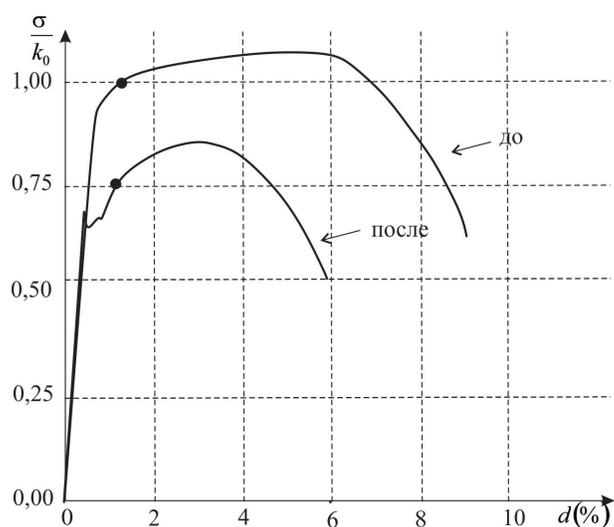


Рис. 5. Диаграмма деформирования до и после теплового воздействия

Использование условия максимальных приведенных напряжений (условия Ишлинского – Ивлева) с введением слагаемого, отвечающего за упрочнение материала, позволяет вычислить остаточные напряжения в материале стальной пластины, подвергнутой локальному термическому влиянию со стороны пламени горючих газов. Следует заметить, что в области интенсивного теплового воздействия происходят структурные превращения, с образованием новых фаз, а так же наблюдается изменения размеров зерна исходных структурных составляющих. С точки зрения упругопластичности это связывается частично с изменением упругих модулей. Таким способом эти изменения, происходящие в зоне теплового локального воздействия, оказывают влияния на прочностные характеристики металла.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Глазов Г.А. Технология металлов и других конструкционных материалов. Ленинград: Госстройиздат, 1972. 520 с.
- [2] Зайчик Л. В., Орлов Б. Д., Чулошников П. Л. Контактная электросварка легких сплавов. Москва: Машгиз, 1963. 220 с.
- [3] Медовар Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. Киев: Машгиз, 1954. 174 с.
- [4] Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. Санкт-Петербург: Политехника, 1993. 391 с.
- [5] Гринфельд М. А. Методы механики сплошных сред в теории фазовых превращений. Москва: Наука, 1990. 312 с.
- [6] Соколов Л. Д. Механические свойства редких металлов. Москва: Металлургия, 1972. 288 с.
- [7] Сидоров Г.И. Об определении температурных напряжений в подкрепленных пластинах методом конечных элементов // Ученые записки ЦАГИ. Жуковский, 1975. № 6(6). С. 74–81.
- [8] Махненко В. И., Великоиваненко Е. А. Упругопластическое состояние в неограниченной тонкой пластинке при произвольном осесимметричном нагреве // Докл. науч. совещания : Тепловые напряжения в элементах конструкции. 1966. № 6. С. 63–70.
- [9] Шевченко Ю. Н. Термопластичность при переменных нагрузениях. Киев: Наук. думка, 1970. 287 с.
- [10] Фролов В.В., Винокуров В.Г., Волченко В.Н. Теоретические основы сварки. Москва: Высшая школа, 1970. 292 с.
- [11] Александров С.Е., Лямина Е.А., Новожилова О.В. Влияние зависимости предела текучести от температуры на напряженное состояние в тонком полом диске // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № (6). С. 43–48.
- [12] Александров С.Е., Ломакин Е.В., Дзенг Й.Р. Решение термоупругопластической задачи для тонкого диска из пластически сжимаемого материала, подверженного термическому нагружению // ДАН. 2012. № 443(3). С. 310–312.
- [13] Буренин А.А., Дац Е.П., Мурашкин Е.В. Формирование поля остаточных напряжений в условиях локального теплового воздействия // Изв. РАН МТТ. 2014. № 2. С. 124–131.
- [14] Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. Москва: Мир, 1964. 517 с.
- [15] Быковцев Г. И., Ивлев Д. Д. Теория пластичности. Владивосток: Дальнаука, 1998. 528 с.
- [16] Ишлинский А.Ю., Ивлев Д.Д. Математическая теория пластичности. Москва: Физматлит, 2001. 704 с.
- [17] Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. Москва: Физматлит, 1963. 252 с.
- [18] Грешков В. М. Об одной модели пластичности для задач обработки металлов давлением // ПМТФ. 2008. № 6. С. 159–169.
- [19] Ершов В.И. Интенсификация формоизменяющих операций листовой штамповки. Москва: Высшая школа, 1989. 87 с.
- [20] Кузнецов Г.В., Шеремест М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
- [21] Полянин А. Д., Зайцев В. Ф. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики: Точное решение. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 432 с.
- [22] Буренин А.А., Каинг М., Ткачева А.В. К расчету плоских напряженных состояний в теории неустановившихся температурных напряжений в упругопластических телах // Дальневосточный математический журнал. 2018. № 18(2). С. 131–146.
- [23] Грешников С. К., Шацов А. А., Ряпосов И.В. Деформационное упрочнение отпускоустойчивых НМС на стадии равномерной деформации // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2013. № 15(3). С. 13–18.

E. E. Abashkin, A. V. Tkacheva

SOFTENING OF STEEL PLATE MATERIAL DUE TO LOCAL TEMPERATURE EXPOSURE

Institute of Machine Science and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk - on - Amur, Russia

Abstract. The paper describes studies of the thermal effect of a combustible gas of an acetylene burner on a steel plate. As a result of this effect, irreversible deformations occur, affecting a decrease in the yield strength of the material. A variety of material represents an experimental path through a series of experiments. Only mathematical models based on Prandtl-Reis models are used to describe physical models. Load balancing modules and modules are temperature dependent. As a criterion of plastic flow, the Ishlinsky-Ivlev condition is adopted, in which the term is introduced, which is responsible for the hardening of the material.

Keywords: temperature stresses, point heating, residual stresses, elasticity, plasticity, hardening, Ishlinsky-Ilev condition

REFERENCES

- [1] Glazov G. A. Leningrad: Mechanical Engineering, 1972. 520 p. (in Russian).
- [2] Zaichik L. V., Orlovand B. D., Chuloshnikov P. L. Resistance welding of light alloys. Moscow: Mashgiz, 1963. (in Russian).
- [3] Medovar B. I. Welding of chromium-nickel austenitic steels. Kiev: Mashgiz, 1954. 174 p. (in Russian).
- [4] Karzov G., Margolin B., Shvetsova V. Physico-mechanical modeling of fracture processes. Saint Petersburg: Polytechnic, 1993. 391 p. (in Russian).
- [5] Greenfeld M. A. Methods of continuum mechanics in the theory of phase transformations. Moscow: Science, 1990. 312 p. (in Russian).
- [6] Sokolov L. D. Mechanical properties of rare metals. Moscow: Metallurgy, 1972. 288 p. (in Russian).
- [7] Sidorov G. On the determination of temperature stresses in reinforced plates by the finite element method // TsAGI Notebooks. Zhukovskiy, 1975. no. 6 (6). P. 74–81. (in Russian).
- [8] Makhnenko B. I., Velikoivanenko E. A. Elastic-plastic state in an unlimited thin plate with arbitrary axisymmetric heating // Dokl. scientific Meetings: Thermal stresses in structural elements. 1966. no. 6. P. 63–70. (in Russian).
- [9] Shevchenko Y. N. Thermoplasticity under variable loads. Kiev: Science. dumka, 1970. 287 p. (in Russian).
- [10] Frolov B., Vinokurov V., Volchenko V. Theoretical basis of welding. Moscow: High School, 1970. 292 p. (in Russian).
- [11] Alexandrov C., Lyamina E., Novozhilova O. The influence of the yield stress on temperature on the stress state in a thin hollow disk // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2013. no. (6). P. 43–48. (in Russian).
- [12] Alexandrov C., Lomakin E., Dzeng J. R. Solving the thermoelastic-plastic problem for a thin disk of plastically compressible material subject to thermal loading // DAN. 2012. no. 443 (3). P. 310–312. (in Russian).
- [13] Burenin A., Dats E., Murashkin E. Formation of the field of residual stresses under local thermal exposure // Izv. RAS MTT. 2014. no. 2. P. 124–131. (in Russian).
- [14] Bolly B., Weiner J. Theory of thermal stresses. Moscow: World, 1964. 517 p. (in Russian).
- [15] Bykovtsev G. I., Ivlev D. D. Theory of plasticity. Vladivostok: Dalnauka, 1998. 528 p. (in Russian).
- [16] Ishlinsky A., Ivlev D. Mathematical Theory of Plasticity. Moscow: Fizmatlit, 2001. 704 p. (in Russian).

Abashkin Evgeny Evgenievich, Junior Researcher, Institute of Machine science and Metallurgy, Komsomolsk - on - Amur, Russia. *Tkacheva Anastasia Valerevna*, Can. Sci. Phys. & Math., Senior Researcher, Institute of Machine science and Metallurgy, Komsomolsk - on - Amur, Russia.

- [17] Parkus G. Unsteady temperature stresses. Moscow: Fizmatlit, 1963. 252 p. (in Russian).
- [18] Greshkov B. M. On a plasticity model for metal forming tasks // Applied Mechanics and Technical Physics. 2008. no. 6. P. 159–169. (in Russian).
- [19] Ershov V. Intensification of form-forming operations of sheet stamping. Moscow: High School, 1989. 87 p. (in Russian).
- [20] Kuznetsov G., Sheremest M. Difference methods for solving heat conduction problems: study guide. Tomsk: TPU Publisher, 2007. 172 p. (in Russian).
- [21] Polyanin A. D., Zaytsev V. F. Handbook of Nonlinear Equations of Mathematical Physics: Exact Solution. Moscow: PHYSMATHLET, 2002. 432 p. (in Russian).
- [22] Burenin A., Kaing M., Tkacheva A. On the calculation of plane stress states in the theory of transient temperature stresses in elastoplastic bodies // Far Eastern Mathematical Journal. 2018. no. 18 (2). P. 131–146. (in Russian).
- [23] Greshnikov P. K., Shatsov A., Ryaposov I. Strain hardening of tempering resistant NMSs at the stage of uniform deformation // Bulletin of PNIPU. Engineering, materials science. 2013. no. 15 (3). P. 13–18. (in Russian).