

Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением

УДК 621.774.338

DOI: 10.14529/met180105

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОДСТУЖИВАНИЯ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ БОРЬБЫ С НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ДЕФОРМАЦИЙ ПО ВЫСОТЕ ЗАГОТОВКИ

Д.В. Перевозчиков^{1,2}, Л.В. Радионова¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² ПАО «Челябинский трубопрокатный завод», г. Челябинск, Россия

В статье указывается на проблему неоднородности зерна, вызванную диссипацией напряжений и неоднородной проработкой всего сечения. Для снижения неоднородности деформации в работе предлагается использовать принудительное подстуживание для создания более горячей и податливой для деформации середины. При этом в работе отмечается, что подстуживание может приводить к захолаживанию торца. Для оценки температурного поля в заготовке разработана математическая модель охлаждения на заготовке, основанная на решении уравнения теплопроводности методом конечных разностей. При решении использована четырехточечная неявная схема Самарского. Задача решена в цилиндрической системе координат и учитывает охлаждение как в радиальном направлении, так и по длине. В качестве граничных условий использованы условия симметрии, равенство производной от температуры по координате нулю и на поверхности смешанное граничное условие, учитывающее излучение согласно закону Стефана – Больцмана и конвективный теплообмен согласно закону Ньютона – Рихмана. Для снижения захолаживания торца предложено использовать экранирование излученной энергии. Приводится формула для оценки условной степени черноты с учетом отраженной экраном энергии. В статье выполнены расчеты поля температур по приведенной в работе методике. Также дана оценка разности сопротивления пластической деформации согласно закону Зинера – Холомона при условии постоянной степени и скорости деформации. Сделан вывод о бесперспективности применения подстуживания заготовки описанным способом в целях борьбы с неоднородностью. Также после проведения расчета было выявлено, что кратковременное подстуживание заготовки с применением экранов может приводить к выравниванию поля температур по длине заготовки.

Ключевые слова: неоднородность температурного поля, подстуживание заготовки, неоднородность структуры по размеру зерна, прошивка труб, метод конечных разностей.

При проведении различных технологических операций ОМД (ковки, прокатки на блюминге или слябинге и других), где обрабатывается заготовка большого размера, может наблюдаться неоднородность пластической деформации, вызванная диссипацией напряжений. В зоне контакта металла с валком достигаются большие напряжения, а по мере удаления от вала в глубину заготовки давление распределяется на все большую и большую площадь, вследствие чего напряжения снижаются. Это явление экспериментально установлено и описано в работах ученых, занимавшихся поперечно-винтовой прокат-

кой труб [1, 2], а также в работах ученых, занимавшихся исследованием прокатки больших заготовок на блюмингах [3–5], где имеется схожее соотношение размеров валков и заготовки. Данное явление описано теоретически и, в частности, представлено в работах [6–8].

В работе [9] для борьбы с неоднородностью деформаций по высоте, вызванной диссипацией напряжений, предлагается применять подстуживание заготовки. Применив подстуживание, мы получим металл с большей температурой в середине стенки и с меньшим сопротивлением деформации, таким

образом мы выравниваем деформации по сечению. В работе [9] заготовка рассматривается как бесконечно длинный цилиндр, и проводится расчет поля температур в зависимости от расстояния до точки от оси заготовки и от времени. Далее, по полю температур проводится оценка разности механических свойств. Исходя из анализа механических свойств, строится предположение о необходимом времени подстуживания. Однако ничего не говорится о температуре торцов заготовки, их механических свойствах и возможности прошить гильзу, имеющую захлаженные торцы. Для оценки возможности применения подстуживания заготовки мы повторно рассчитали температуру, но уже как функцию двух пространственных координат и времени, т.е. решили уравнение (1) [10]. Для решения задачи использовали параметры материала, заготовки и окружающей среды, представленные в табл. 1.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала; c – теплоемкость металла; λ – теплопроводность материала; T – температура тела; t – время; r – координата тела, характеризующая удаленность точки от оси заготовки; z – пространственная координата, характеризующая положение точки по длине заготовки.

Температурное поле будет симметрично относительно оси, относительно середины заготовки по ее длине, и распределение температур будет зеркальным в 4 областях. Поэтому будем вычислять температуры только для одной четверти заготовки.

Мы задались начальными и граничными условиями. Так как время выдержки в печи длительно, то можем считать, что заготовка прогрета равномерно, математически начальные условия запишем следующим образом:

$$t = 0: T = T_0, \quad 0 < r < \frac{D}{2}, \quad 0 < z < \frac{L}{2}, \quad (2)$$

где D – диаметр заготовки; L – длина заготовки.

В середине заготовки на оси и в плоскости, разбивающей заготовку на две половины по длине, из условия симметрии приняли следующие граничные условия:

$$r = 0: \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad t > 0; \quad (3)$$

$$z = 0: \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad t > 0. \quad (4)$$

На поверхности заготовки происходит отвод тепла в окружающую среду конвективной теплоотдачей и излучением. Около поверхности заготовки будет образовываться тонкий слой воздуха, нагретого до температур больших, чем температура окружающей среды. Но так как окружающая среда воздух, а воздух имеет малую вязкость и степень черноты (прозрачен для излучения и практически не излучает тепло), то присутствием тонкого теплового слоя воздуха можно пренебречь, а температуру воздуха в пограничном слое принять равной температуре окружающей среды [10]. Исходя из этого, мы записали граничные условия, для поверхности заготовки используя законы Ньютона – Рихмана и Стефана – Больцмана:

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Материал заготовки	08X18H10T
Диаметр D , мм	580
Длина L , мм	1750
Плотность материала [11] ρ , кг/м ³	7900
Теплопроводность материала [11] λ , Вт/(м·К)	29
Теплоемкость материала [11] C , Дж/(кг·К)	690
Коэффициент конвективной теплоотдачи между металлом и воздухом [10] α , Вт/(м ² ·К)	4,2
Степень черноты стали, ϵ	0,6
Температура материала в момент выдачи из печи T_0 , °С	1280
Температура окружающей среды $T_{окр.среды}$, °С	20

$$r = R: \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha (T_{\text{окр.среды}} - T) + \varepsilon \sigma (T_{\text{окр.среды}}^4 - T^4), \quad t > 0; \quad (5)$$

$$z = \frac{L}{2}: \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha (T_{\text{окр.среды}} - T) + \varepsilon \sigma (T_{\text{окр.среды}}^4 - T^4), \quad t > 0, \quad (6)$$

где α – коэффициент конвективной теплоотдачи; σ – константа Стефана – Больцмана $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² · К⁴; ε – степень черноты; $T_{\text{окр.среды}}$ – температура окружающей среды.

Для решения задачи использован метод конечных разностей на основе неявной четырехточечной схемы, выбрана равномерная пространственная решетка. Мы выполнили дискретизацию уравнения на основе локальной одномерной схемы А.А. Самарского. Схема Самарского является абсолютно устойчивой и обладает свойством суммарной аппроксимации [12, 13]. Шаг по времени реализуется в два этапа: сначала в направлении одной координаты r , далее в направлении второй координаты z .

$$r = i \cdot \Delta r; \quad i = 1, 2, \dots, N + 1; \quad r = 0, r_2, \dots, r_{N+1}; \quad (7)$$

$$z = j \cdot \Delta z; \quad j = 1, 2, \dots, K + 1; \quad z = 0, z_2, \dots, z_{K+1}, \quad (8)$$

где Δr – шаг по пространственной координате r ; Δz – шаг по пространственной координате z ; i, j – номера индексов, N и K – количество шагов по пространственным координатам r и z соответственно.

Аналогично вводится временная сетка:

$$t_n = n \cdot \tau; \quad n = 1, 2, \dots, M + 1; \quad t = 0, t_2, \dots, t_{M+1}, \quad (9)$$

где τ – размер шага по времени; M – количество шагов по времени.

Заменим дифференциальные операторы на их конечно-разностные аналоги [12, 13]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j,n+\frac{1}{2}} - T_{i,j,n}}{\tau} \quad \text{и} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j,n+1} - T_{i,j,n+\frac{1}{2}}}{\tau}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\Delta r^2} \left(r_{i+\frac{1}{2},j} \cdot T_{i+1,j,n+\frac{1}{2}} - \left(r_{i-\frac{1}{2},j} + r_{i+\frac{1}{2},j} \right) \cdot T_{i,j,n+\frac{1}{2}} + r_{i-\frac{1}{2},j} \cdot T_{i-1,j,n+\frac{1}{2}} \right); \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{i,j+1,n+1} - 2 \cdot T_{i,j,n+1} + T_{i,j-1,n+1}}{\Delta z^2}, \quad (12)$$

где $r_{i-\frac{1}{2},j} = \frac{r_{i-1,j} + r_{i,j}}{2}$, $r_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{r_{i,j} + r_{i+1,j}}{2}$, n – шаг по временной координате; $\left(n + \frac{1}{2} \right)$ – полшага по времени; $(n+1)$ – следующий шаг по времени.

Распределение температуры на новом шаге мы определяли согласно уравнениям [12, 13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \cdot c \frac{T_{i,j,n+\frac{1}{2}} - T_{i,j,n}}{t} = \lambda \left[\frac{T_{i+1,j,n+\frac{1}{2}} - 2T_{i,j,n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j,n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right]; \\ \rho \cdot c \frac{T_{i,j,n+1} - T_{i,j,n+\frac{1}{2}}}{\tau} = \frac{\lambda}{r_i \cdot \Delta r^2} \left[\left(r_i + \frac{dr}{2} \right) \cdot T_{i+1,j,n+1} - \left(r_{i-\frac{1}{2}} + r_{i+\frac{1}{2}} \right) T_{i,j,n+1} + r_{i-\frac{1}{2}} \cdot T_{i-1,j,n+1} \right]. \end{array} \right. \quad (13)$$

Полученные системы уравнений сводятся к общему виду [12, 13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_l j \cdot T_{i,j+1,n+\frac{1}{2}} - B_l j \cdot T_{i,j,n+\frac{1}{2}} + C_l j \cdot T_{i,j-1,n+\frac{1}{2}} = F_l i,j; \\ A_i \cdot T_{i+1,j,n+1} - B_i \cdot T_{i,j,n+1} + C_i \cdot T_{i-1,j,n+1} = F_i,j, \end{array} \right. \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned}
 Al_j &= \frac{\lambda}{\Delta z^2}; \quad Bl_j = \frac{\lambda}{\Delta z^2} + \frac{\rho c}{\tau}; \quad Cl_j = \frac{\lambda}{\Delta z^2}; \quad Fl_{i,j} = -\frac{\rho c}{\tau} T_{i,j,n}; \\
 A_i &= \frac{\lambda}{\Delta r^2} \cdot \frac{r_{i+1/2}}{r_i}; \quad B_i = \frac{2\lambda}{\Delta r^2} + \frac{\rho c}{\tau}; \quad C_i = \frac{\lambda}{\Delta r^2} \cdot \frac{r_{i-1/2}}{r_i}; \quad F_{i,j} = -\frac{\rho c}{\tau} T_{i,j,n+\frac{1}{2}}.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Трехточечные уравнения сводятся к двухточечным:

$$\begin{cases}
 T_{i,j,n+\frac{1}{2}} = a_j \cdot T_{i,j+1,n+\frac{1}{2}} + b_{l_{i,j}}; \\
 T_{i,j,n+1} = a_i \cdot T_{i+1,j,n+1} + b_{i,j},
 \end{cases}
 \tag{16}$$

где $a_j = \frac{Al_j}{Bl_j - Cl_j \cdot a_{j-1}}$; $b_{l_{i,j}} = \frac{C_j \cdot b_{i,j-1} - F_{i,j}}{B_j - C_j \cdot a_{j-1}}$; $a_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot a_{i-1}}$; $b_{i,j} = \frac{C_i \cdot b_{i-1,j} - F_{i,j}}{B_i - C_i \cdot a_{i-1}}$.

Для определения a_i , $b_{i,j}$ и a_j , $b_{l_{i,j}}$ по (16) необходимо знать a_1 , $b_{i,1}$, и a_{l_1} , $b_{l_{1,j}}$, которые находим из левых граничных условий:

$$a_1 = 1; \quad b_{i,1} = 0; \quad a_{l_1} = 1; \quad b_{l_{1,j}} = 0.$$

Правое граничное условие используется для определения температуры на поверхности:

$$\begin{cases}
 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=D/2} = \alpha (T_{\text{окр.среды}} - T_{N+1,j}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{окр.среды}}^4 - T_{N+1,j}^4); \\
 \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L/2} = \alpha (T_{\text{окр.среды}} - T_{i,K+1}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{окр.среды}}^4 - T_{i,K+1}^4);
 \end{cases}
 \tag{17}$$

$$\begin{cases}
 \lambda \frac{T_{N+1,j,n+1} - T_{N,j,n+1}}{\Delta r} = \alpha (T_{\text{окр.среды}} - T_{N+1,j,n+1}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{окр.среды}}^4 - T_{N+1,j,n+1}^4); \\
 \lambda \frac{T_{i,K+1,n+\frac{1}{2}} - T_{i,K,n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} = \alpha \left(T_{\text{окр.среды}} - T_{i,K+1,n+\frac{1}{2}} \right) + \varepsilon \sigma \left(T_{\text{окр.среды}}^4 - T_{i,K+1,n+\frac{1}{2}}^4 \right).
 \end{cases}
 \tag{18}$$

В системе уравнений (18), используя выражение (16), выполним замену неизвестных $T_{i,K,n+\frac{1}{2}}$

и $T_{N,j,n+1}$, в результате чего получим систему:

$$\begin{cases}
 \lambda \frac{T_{i,K+1,n+\frac{1}{2}} - a_j \cdot T_{i,K+1,n+\frac{1}{2}} - b_{l_{i,j}}}{\Delta z} = \alpha \left(T_{\text{окр.среды}} - T_{i,K+1,n+\frac{1}{2}} \right) + \varepsilon \sigma \left(T_{\text{окр.среды}}^4 - T_{i,K+1,n+\frac{1}{2}}^4 \right); \\
 \lambda \frac{T_{N+1,j,n+1} - a_i \cdot T_{N+1,j+1,n+1} - b_{i,j}}{\Delta r} = \alpha (T_{\text{окр.среды}} - T_{N+1,j,n+1}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{окр.среды}}^4 - T_{N+1,j,n+1}^4).
 \end{cases}
 \tag{19}$$

После, рассчитав все прогоночные коэффициенты и температуры на поверхности, мы рассматривали распределение температур в заготовке на следующем шаге по формуле (16).

Без проведения математических расчетов понятно, что температура торца заготовки будет резко ниже температуры в срединных сечениях. Мы можем уменьшить этот перепад, применяя экранирование при подстуживании. Заготовка транспортируется по рольгангу около 90 с, после чего сваливается на стол перед зацентровщиком. Подстуживание заготовок выполняется именно в этом месте, и установить экраны удобно здесь. Для того чтобы рассчитать температурное поле в заготовке при использовании экранов около торцев, в течение первых 90 с на торце заготовки использовали граничные условия (6), после 90 с граничные условия поменяются, степень черноты материала уменьшится (конечно степень черноты материала останется такой же, но часть тепла, излученного торцем заготовки, будет отражаться от экрана и вновь падать на торец; для упрощения расчетов мы будем считать, что торец имеет меньшую, чем прежде, степень черноты, назовем эту величину условной степенью черноты ε^*). Записали граничные условия на торце в математическом виде:

$$\begin{cases} z = \frac{L}{2} : \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha (T_{\text{окр.среды}} - T) + \varepsilon \sigma (T_{\text{окр.среды}}^4 - T^4), & t \in [0; 90]; \\ z = \frac{L}{2} : \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha (T_{\text{окр.среды}} - T) + \varepsilon^* \sigma (T_{\text{окр.среды}}^4 - T^4), & t > 90. \end{cases} \quad (20)$$

Далее мы выразили условную степень черноты торца ε^* следующим образом. Пусть E – тепловой поток, излучаемый абсолютно черным телом, имеющим такую же температуру, как и торец заготовки. Тогда наше тело излучает εE , экран имеет степень черноты ε_3 и поглощает тепловой поток $\varepsilon_3 \varepsilon E$, а энергию $(1 - \varepsilon_3) \varepsilon E$ отражает. Будем считать, что вся отраженная от экрана энергия падает на торец заготовки и поэтому торец заготовки поглотит следующее количество тепла $(1 - \varepsilon_3) \varepsilon E$. Таким образом, с торца заготовки излучается тепловой поток εE , и на торец падает тепловой поток $(1 - \varepsilon_3) \varepsilon E$, исходя из этого, условная степень черноты определяется формулой [10]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon - (1 - \varepsilon_3) \varepsilon. \quad (21)$$

На практике могут быть применены экраны из материалов, представленных в табл. 2.

На основании данных табл. 2 примем степень черноты экрана равной $\varepsilon_3 = 0,2$. Такая степень черноты является усредненным значением степени черноты различных материалов, используемых в качестве экранов. При таком значении степени черноты экрана условная степень черноты торца равна $\varepsilon^* = 0,12$.

Так мы рассчитали температуры в заготовке через 90, 150, 300, 600 с после выдачи из печи (рис. 1–4) при условии использования экранов у торцов и без использования экранов.

Из термограмм мы видим, что при длительном подстуживании поверхность начинает охлаждаться до температур, ведение процесса при которых становится опасным. После подстуживания в течение 10 мин вся поверхность заготовки имеет температуру порядка 950–1000 °С, что может привести к образованию дефектов поверхности. При этом

Таблица 2
Степень черноты некоторых материалов, используемых в качестве экранов [14]

Материал	Диапазон температур t , °С	Степень черноты ε
Сталь, нержавеющая аустенитного класса	477–1310	0,24–0,31
Алюминий окисленный	200–600	0,11–0,19
Медь слегка полированная	311	0,15
Сталь полированная	500–900	0,27–0,31

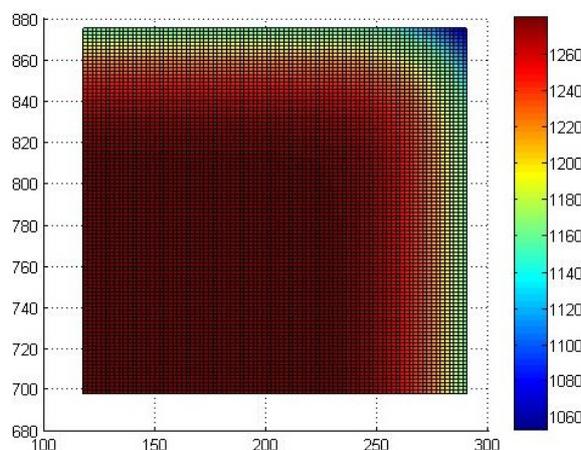


Рис. 1. Температурное поле через 90 с после выдачи из печи

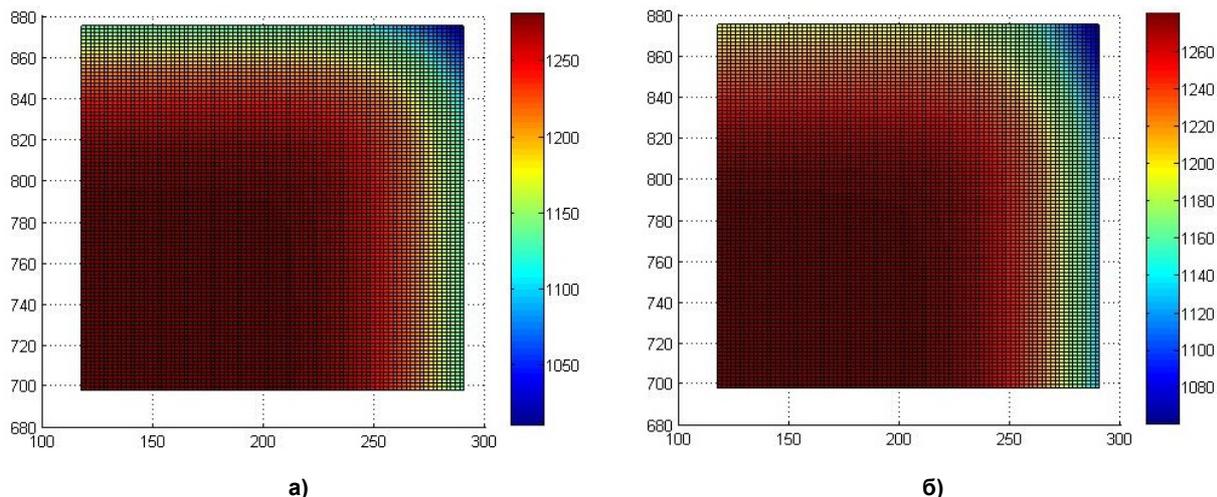


Рис. 2. Температурное поле через 150 с после выдачи из печи:
а – без применения экранов; б – с применением экранов

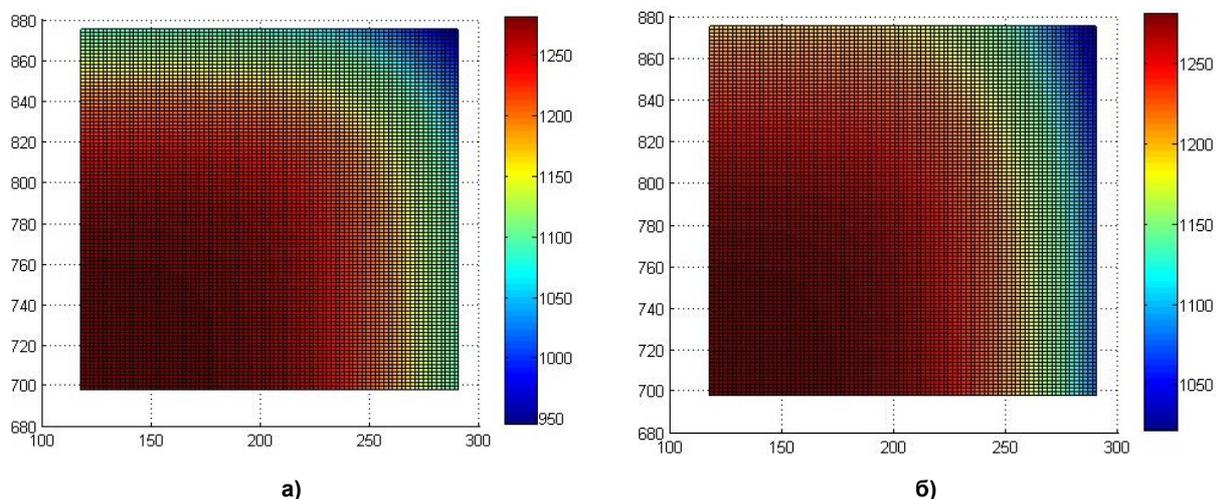


Рис. 3. Температурное поле через 300 с после выдачи из печи:
а – без применения экранов; б – с применением экранов

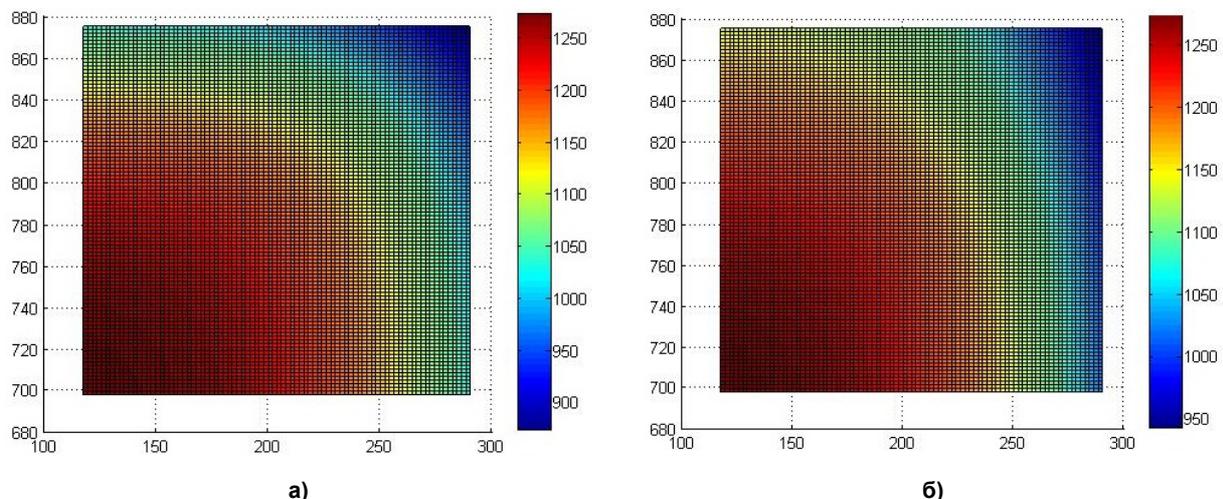


Рис. 4. Температурное поле через 600 с после выдачи из печи:
а – без применения экранов; б – с применением экранов

Таблица 3

Глубина подстуженного температурного слоя

Время подстуживания, с	90	120	150	300	600
Глубина слоя, мм	42	52	60	94	146

не происходит проникновения неоднородности температур до середины заготовки. Глубина слоя, где возникает неоднородность механических свойств по причине неоднородности температур в разные моменты времени, представлена в табл. 3.

При использовании экранов удастся значительно уменьшить захлаживание торцов; в начальный момент времени применения экранирования может даже происходить разогрев поверхности металла или поверхностных слоев за счет передачи тепла центральных слоев, что видно из графиков распределения температуры (рис. 5. и 6). Разогрев поверхности происходит на 40 °С, а разогрев слоев на глубине 5,4 мм – на 25 °С в течение 60 с после

установки экранов, далее разогрев торцов прекращается. Также из графиков на рис. 7 и 8 мы видим, что через 20–30 с замедляется скорость охлаждения слоев на удалении 18 и 45 мм от торца.

Для оценки неоднородности пластических свойств воспользуемся формулой [15]:

$$\sigma_S = K_0 \varepsilon_d^{K_\varepsilon} U^{K_U} \exp(-K_t \cdot t), \quad (22)$$

где ε_d – степень деформации; U – скорость деформации; t – температура деформации; $K_0 = 325$; $K_{\varepsilon_d} = 0,28$; $K_U = 0,087$; $K_t = -0,0028$ – эмпирически полученные коэффициенты [14].

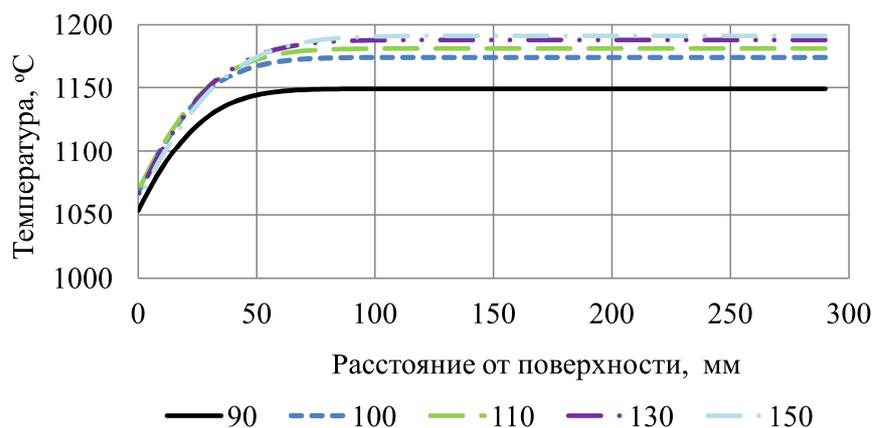


Рис. 5. Распределение температур на торце через 90, 100, 110, 130 и 150 с после выдачи из печи (в момент времени 90 с у торцов заготовки помещены экраны)

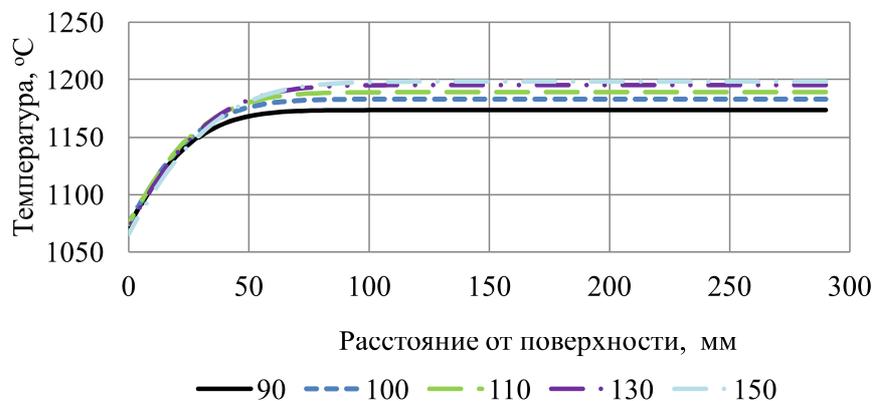


Рис. 6. Распределение температур на глубине 5,4 мм от торца 90, 100, 110, 130 и 150 с после выдачи из печи (в момент времени 90 с у торцов заготовки помещены экраны)

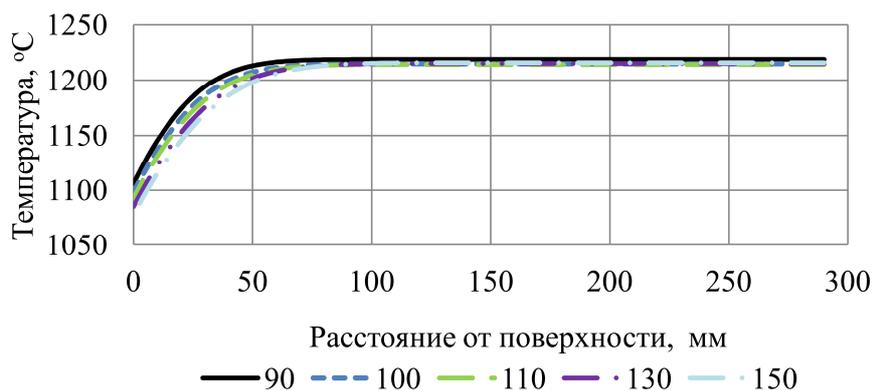


Рис. 7. Распределение температур на глубине 18 мм от торца 90, 100, 110, 130 и 150 с после выдачи из печи (в момент времени 90 с у торцов заготовки помещены экраны)

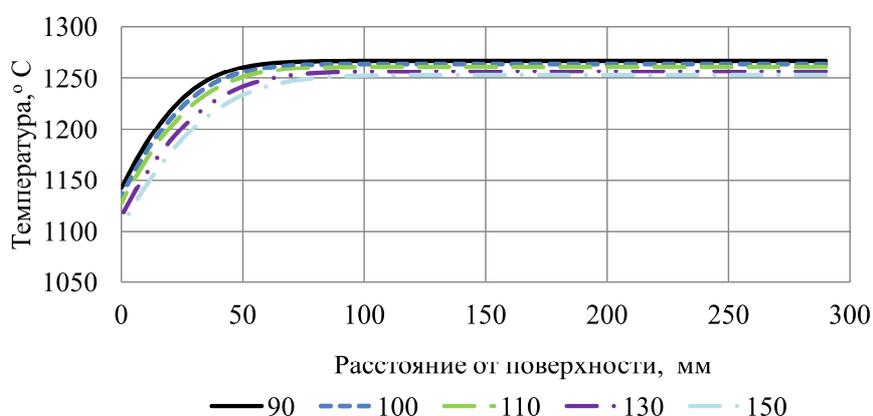


Рис. 8. Распределение температур на глубине 45 мм от торца 90, 100, 110, 130 и 150 с после выдачи из печи (в момент времени 90 с у торцов заготовки помещены экраны)

Так как нам неизвестно поле скорости и степени деформации, оценим разницу механических свойств при $\epsilon_d = \text{const}$ и $U = \text{const}$, т. е. покажем влияние на сопротивление деформации только температуры, выполним

это, рассчитав величину (будем называть ее фактор температуры):

$$K = \exp(-K_f \cdot t). \tag{23}$$

Результаты расчета этой величины представлены на диаграммах рис. 9–12.

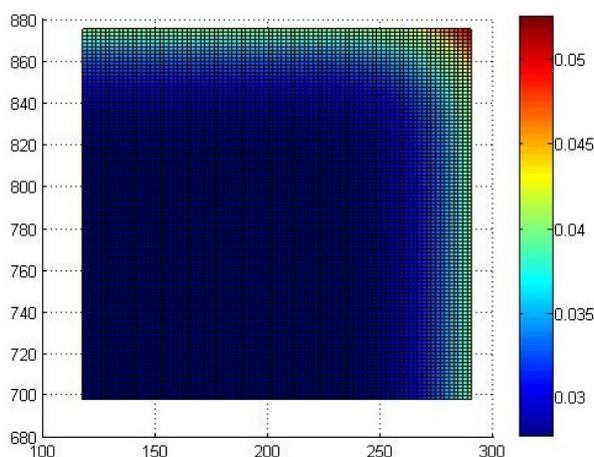


Рис. 9. Распределение функции $K(t(z,r))$ через 90 с после выдачи из печи

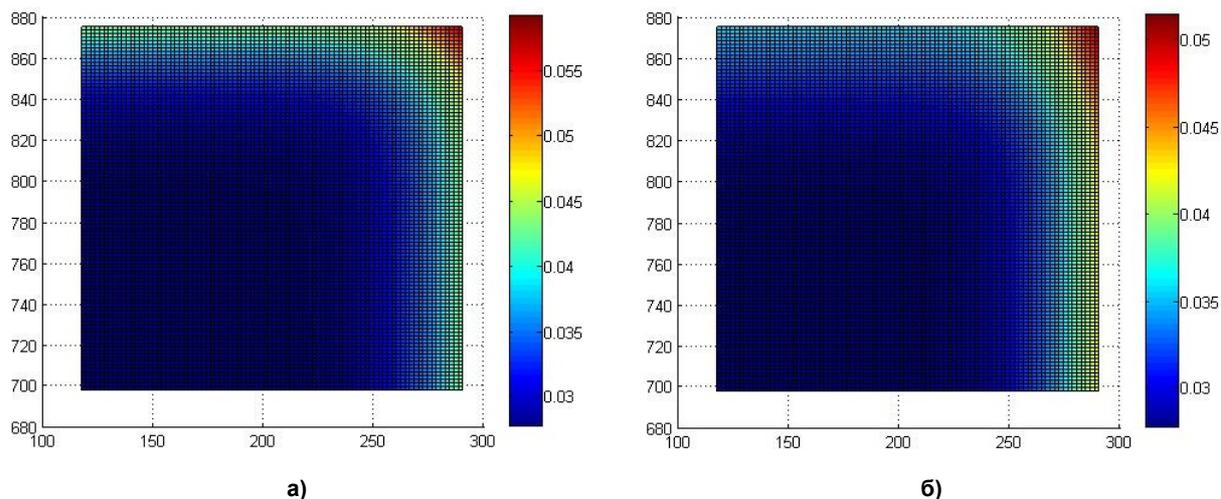


Рис. 10. Распределение функции $K(t(z,r))$ через 150 с после выдачи из печи:
а – без использования экранов; б – с использованием экранов

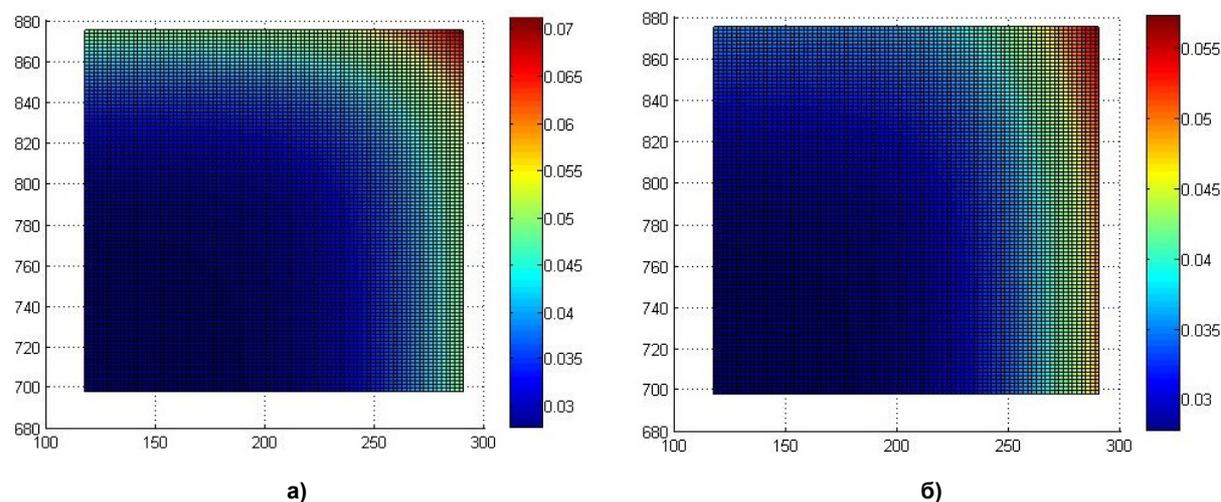


Рис. 11. Распределение функции $K(t(z,r))$ через 300 с после выдачи из печи:
а – без использования экранов; б – с использованием экранов

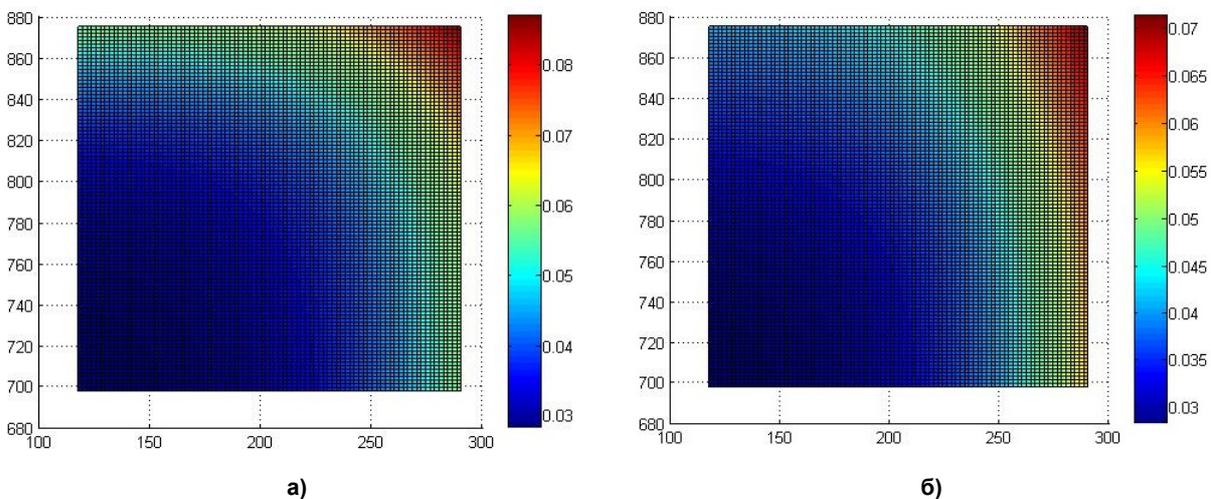


Рис. 12. Распределение функции $K(t(z,r))$ через 600 с после выдачи из печи:
а – без использования экранов; б – с использованием экранов

Применяя подстуживание заготовки, можно добиться разницы по значению сопротивления деформации от середины к торцу более чем в 2 раза (при равных скорости и степени деформации), но это неоднородность заключена примерно в слое 100 мм от поверхности, а необходимо распространить ее на всю глубину. Для этого нужно уменьшить тепловой поток, излучающийся с боковой поверхности гильзы, это можно сделать, применив экранирование и на боковой поверхности. Данные расчеты показывают, что основным фактором лимитирующим скорость охлаждения срединных слоев металла является теплопроводность материала, и для получения равномерного перепада температур требуется замедлить теплообмен поверхности и применение подстуживания без применения устройств, замедляющих теплообмен на поверхности, не имеет смысла.

Литература

1. Поперечная прокатка в машиностроении / В.С. Смирнов, В.П. Анисифоров, М.В. Васильчиков и др. – М.: Металлургия, 1957. – 375 с.
2. Фомичев, И.А. Косая прокатка / И.А. Фомичев. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во по черной и цветной металлургии, 1963. – 262 с.
3. Чекмарев, А.П. Теория прокатки крупных слитков / А.П. Чекмарев. – М.: Металлургия, 1968. – 252 с.
4. Литовченко, Н.В. Применение высоких обжатий на блумингах / Н.В. Литовченко. – М.: Металлургиздат, 1956. – 72 с.
5. Чижииков, Ю.М. Теория подобиия и моделирование процессов обработки металлов давлением / Ю.М. Чижииков. – М.: Металлургия, 1970. – 294 с.
6. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон; пер. с англ. В.Э. Наумова, А.А. Спектора; под ред. Р.В. Гольдштейна. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
7. Бэкофен, В. Процессы деформации / В. Бэкофен; пер с англ. В.С. Берковского, Ф.И. Рузанова; под ред. С.Е. Рокотьяна. – М.: Металлургия, 1977. – 288 с.
8. Восканьянц, А.А. Моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки на основе Эйлера описания движения сплошной среды / А.А. Восканьянц, А.В. Иванов // Наука и образование. – 2009. – № 1. – С. 25–30.
9. Оценка возможности применения подстуживания заготовки для снижения диссипации напряжений при прошивке труб / Д.В. Перевозчиков, В.Н. Еремин, К.В. Васючкова, Л.В. Радионова // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – Т. 5, № 3. – С. 54–59. DOI: 10.24892/RIJE/20170309
10. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1975. – 416 с. DOI: 10.1080/01457638108939575
11. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
12. Самарский, А.Н. Вычислительная теплопередача / А.Н. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
13. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учеб. пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
14. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэл; пер. с англ. под ред. Д.Н. Хрусталева. – М.: Мир, 1975. – 935 с.
15. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.

Перевозчиков Данил Викторович, аспирант кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет; ведущий инженер-исследователь, ПАО «Челябинский трубопрокатный завод», г. Челябинск; perevozchikov91@mail.ru.

Радионова Людмила Владимировна, канд. техн. наук, заведующий кафедрой процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет; radionovalv@rambler.ru.

Поступила в редакцию 16 января 2018 г.

ESTIMATE OF POSSIBILITIES APPLYING BILLET CALLING-DAWING FOR DECREASING INHOMOGENEITY DEFORMATION BY HIGH OF DEFORMATION ZONE

D.V. Perevozchikov^{1,2}, perevozchikov91@mail.ru,
L.V. Radionova¹, radionovalv@rambler.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² PJSC Chelyabinsk Pipe-Rolling Plant, Chelyabinsk, Russian Federation

In the article considers the problem of the heterogeneity of grain caused by the dissipation of stresses and non-uniform examination of the high deformation zone. To reduce the inhomogeneous deformation in the work it is proposed to use forced calling-dawn to create more hot and pliable to deform the middle billet. The paper also notes that calling-dawn can be reason of freezing the side-wall billet. To estimate the temperature field in the workpiece, a mathematical model of cooling on the workpiece is developed. The mathematical model is based on the solution of the heat equation by finite difference method. At the decision the four-point implicit scheme of Samarskii is used. The problem is solved in the cylindrical coordinate system, and takes into account the cooling in the radial direction and length. As boundary conditions, the symmetry conditions, the temperature derivative equality at the coordinate zero, and on the surface the mixed boundary condition considering radiation according to the Stefan-Boltzmann law and convective heat exchange according to the Newton-Richmann law are used. It is proposed to use shielding of radiated energy to reduce end face hardening. A formula is given to estimate the conditional emissivity factor, taking into account the reflected energy screen. In the article calculations of the temperature field according to the method given in the work are carried out. Also the estimation of the difference of the resistance to plastic deformation according to the law of the Zener-Holomon subject to a constant strain and rate of deformation. The conclusion about the futility of the use of calling-dawn of the workpiece in the described way in order to deal with heterogeneity of deformation. After the calculation it was found that short-term calling-dawn of the workpiece with the use of screens can lead to the small alignment of the temperature field along the length of the workpiece.

Keywords: inhomogeneity of temperature field, calling-dawn of billet, Inhomogeneity of structure by grain size, piercing pipes, finite difference methods.

References

1. Smirnov V.S., Anisiforov V.P., Vasil'chikov M.V. et al. *Poperechnaya prokatka v mashinostroenii* [Cross Rolling in the Mechanical Engineering]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1957. 375 p.
2. Fomichev I.A. *Kosaya prokatka* [Cross Rolling]. Moscow, Gosudarstvennoye nauchno-technicheskoe izdatel'stvo po chearnoy i tsvetnoy metalrgii, 1963. 262 p.
3. Chekmarev A.P. *Teoriya prokatki krupnykh slitkov* [Theory of Rolling Big Ingots]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968. 252 p.
4. Litovchenko N.V. *Primenenie vysokikh obzhatiy na blumingakh* [Applying of Big Deformation on Blooming]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1956. 72 p.
5. Chizhikov Yu.M. *Teoriya podobiya i modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem* [Theory of Similarity and Simulation Metal Treatment Under Pressure]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 294 p.
6. Johnson K.L. *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, 1985. DOI: 10.1017/CBO9781139171731
7. Backofen W.A. *Processy deformacii* [Deformation Processing]. Transl. from Engl. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 288 p.
8. Voskan'yants A.A. [Modeling of the Process of Cross-Rolling on the Basis of the Eulerian Description of Motion of a Continuous Medium]. *Science and Education*, 2009, no. 1, pp. 25–30. (in Russ.)

9. Perevozchikov D.V., Eremin V.N., Vasiuchkova K.V., Radionova L.V. [Estimate of Possibility Applying Billet Calling-Dawn for Decreasing Dissipation of Stress in Piercing]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2017, vol. 5, no. 3, pp. 54–59. (in Russ.) DOI: 10.24892/RIJIE/20170309

10. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat Transfer]. Moscow, Energoizdat Publ., 1975. 416 p. DOI: 10.1080/01457638108939575

11. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoy tekhniki* [Thermophysical Properties of Materials of Nuclear Engineering]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968. 484 p.

12. Samarskiy A.N., Vabishchevich P.N. *Vychislitel'naya teploperedacha* [Computational Heat Transfer]. Moscow, Editorial URSS, 2003. 784 p.

13. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti* [Difference Methods for Solving Heat Conduction Problems]. Tomsk, TPU, 2007. 172 p.

14. Siegel R., Howell J. *Teploobmen izlucheniem* [Heat Transfer by Radiation]. Transl. from Engl. Moscow, Mir Publ., 1975. 935 p.

15. Tret'yakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke metallov davleniem* [Mechanical Properties of Steels and Alloys in Plastic Deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 224 p.

Received 16 January 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Перевозчиков, Д.В. Оценка возможности применения подстуживания заготовки для борьбы с неоднородностью деформаций по высоте заготовки / Д.В. Перевозчиков, Л.В. Радионова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 36–47. DOI: 10.14529/met180105

FOR CITATION

Perevozchikov D.V., Radionova L.V. Estimate of Possibilities Applying Billet Calling-Dawning for Decreasing Inhomogeneity Deformation by High of Deformation Zone. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 36–47. (in Russ.) DOI: 10.14529/met180105