

УДК 621.77.016.3

А. В. Алифанов, доктор технических наук, профессор,
заведующий отделом (ФТИ НАН Беларуси);
А. М. Милюкова, научный сотрудник (ФТИ НАН Беларуси);
Н. В. Бурносков, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНОЙ ПРОСЛОЙКИ НА ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ ЗАГОТОВКА – ИНСТРУМЕНТ ПРИ ХОЛОДНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ

Рассмотрены вопросы теплообмена в системе заготовка – инструмент в процессе холодного пластического деформирования со смазкой и без нее. Получены аналитические зависимости для определения влияния смазочной прослойки на теплообмен в системе.

The paper considers the questions of heat exchange in system billet - the tool in the process of cold plastic deformation with lubricant layer and without it. The authors were derived the analytical expressions for definition of influence of a lubricant layer on heat exchange in system.

Введение. В настоящее время большое количество деталей (шестерни, звездочки, храповики, шлицевые валы и др.), используемых в станкостроительной промышленности для изготовления деревообрабатывающего оборудования, получают методами пластического деформирования, которые обеспечивают безотходные технологии, улучшение эксплуатационных свойств и качество поверхности готовых деталей. Однако в этих процессах существует проблема, связанная с образованием очагов схватывания заготовки с инструментом при разрывах смазочной прослойки. Это приводит к ухудшению качества поверхности готовых изделий, снижению стойкости инструмента, браку. На процесс образования очагов схватывания сильно влияет температура системы заготовка – инструмент.

Исследование теплопередачи через границу заготовка – инструмент в условиях отсутствия смазочной прослойки при холодном пластическом деформировании. Рассмотрим процесс теплопередачи через границу заготовка – инструмент при холодном пластическом деформировании компактных материалов, отнеся к ним и спрессованные до компактного состояния пористые материалы.

При аналитическом моделировании температурного состояния системы заготовка – инструмент часто используют решения задач теории теплопроводности для твердых (пластически недеформируемых) тел. Подобный подход является оправданным в том случае, если процесс формообразования осуществляется при незначительном рабочем ходе и малой скорости перемещения деформирующего инструмента. В других случаях теплотехнические расчеты требуют учета пластической деформации.

С целью выяснения влияния параметров пластической деформации на температурные изменения в системе заготовка – инструмент рассмотрим задачу в следующей постановке.

Имеется система двух полуограниченных тел с различными начальными температурами, имитирующих инструмент 1 и заготовку 2 (рис. 1). В начальный момент времени эти тела приведены в контакт при отсутствии межконтактных смазочных прослоек, причем одно из них (заготовка 2) подвергается пластической деформации с постоянной скоростью ω (рис. 1, а).

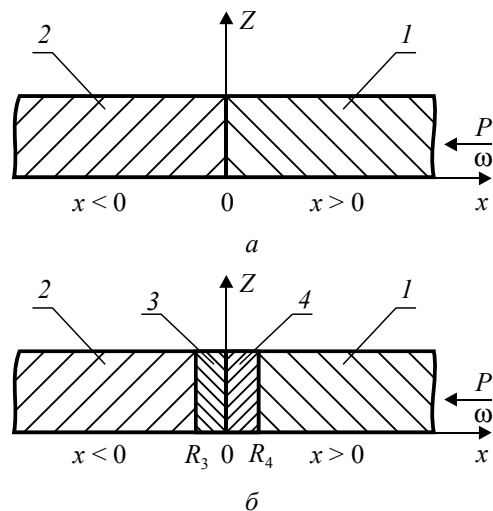


Рис. 1. Схема пластического деформирования заготовки инструментом:

- а – при отсутствии смазочной прослойки;
- б – при наличии смазочных прослоек;
- 1 – инструмент; 2 – заготовка; 3 – смазочная прослойка толщиной R_3 на заготовке;
- 4 – смазочная прослойка толщиной R_4 на инструменте

При размещении начала координат 0 на границе соприкосновения тел условие задачи можно записать следующим образом, причем индексом 1 помечены величины, относящиеся к недеформируемому телу (инструмент), а индексом 2 – к деформируемому (заготовке) (рис. 1, а):

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \alpha_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}; \quad t > 0, \quad x > 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} = \alpha_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} - \varpi_x \frac{\partial t_2}{\partial x}, \quad \tau > 0, \quad x < 0; \quad (2)$$

$$t_1(x, 0) = 0, \quad t_2(x, 0) = t_0; \quad (3)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2(0, \tau)}{\partial x}; \quad (4)$$

$$t_1(0, \tau) = t_2(0, \tau); \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1(-\infty, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2(+\infty, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

где $t_{1,2}(x, t)$ – температура соответствующего тела (1 или 2) в точке x в момент времени τ ; λ_1, λ_2 и α_1, α_2 – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности соответственно для тел 1 и 2; ϖ_x – скорость перемещения сечения деформируемой среды, причем для однородной среды:

$$\varpi_x = \frac{dL}{d\tau} \frac{x}{L},$$

где L – характерный размер тела в направлении оси Ox в момент времени τ .

Заметим, что принятое условие неограниченности для инструмента и заготовки должно рассматриваться лишь в тепловом отношении в плане ослабления потока тепла по длине этих тел за время выполнения операции деформирования.

Решение дифференциальных уравнений в частных производных (1), (2) представляет известные математические трудности, поэтому краевую задачу (1)–(6) – покажем в виде двух более простых.

$$\text{I.} \quad \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \alpha_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2}; \quad \tau > 0, \quad x > 0; \\ t_1(x, 0) = 0; \quad (7)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} = \varphi(\tau); \quad \frac{\partial t_1(-\infty, \tau)}{\partial x} = 0.$$

$$\text{II.} \quad \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = \alpha_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} - \varpi_x \frac{\partial t_2}{\partial x}; \quad \tau > 0, \quad x < 0; \\ t_2(x, 0) = t_0; \quad \lambda_2 \frac{\partial t_2(0, \tau)}{\partial x} = \varphi(\tau); \quad (8)$$

$$\frac{\partial t_2(+\infty, \tau)}{\partial x} = 0.$$

В (7), (8) $\varphi(\tau)$ – функция плотности теплового потока на контакте инструмента и заготовки, подлежащая определению.

Решение задачи (7) известно [1]:

$$t_1(x, \tau) = \frac{\sqrt{\alpha_1}}{\lambda \sqrt{\pi}} \int_0^\tau \frac{\varphi(\tau^*)}{\sqrt{\tau - \tau^*}} \left[-\frac{x^2}{4\alpha_1(\tau - \tau^*)} \right] d\tau^*, \quad (9)$$

где τ^* – переменная интегрирования.

Для решения задачи (8) в уравнении (2) перейдем к новым переменным по формулам:

$$x_0 = x \exp(-\omega\tau); \quad \tau_0 = \frac{[1 - \exp(-2\omega\tau)]}{2\omega}, \quad (10)$$

где ω – скорость деформации.

В результате получим новые выражения для (8):

$$\text{II'.} \quad \frac{\partial t_2(x_0, \tau_0)}{\partial \tau_0} = \alpha_2 \frac{\partial^2 t_2(x_0, \tau_0)}{\partial x_0^2}; \\ \tau_0 > 0, \quad x_0 > 0; \quad t_2(x_0, 0) = t_0; \quad (11)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial t_2(0, \tau_0)}{\partial x_0} = q(\tau_0); \quad \frac{\partial t_2(+\infty, \tau)}{\partial x_0} = 0,$$

где $q(\tau_0) = \varphi(\tau_0) \sqrt{1 - \omega\tau_0}$.

Применяя для решения задачи (11) преобразование Лапласа по переменной τ_0 и переходя затем от изображения к оригиналам с помощью таблицы изображений и теоремы о свертке функций [1], а затем, возвращаясь к первоначальным переменным x и τ , будем иметь:

$$t_2(x, \tau) = t_0 - \frac{\sqrt{2\omega\alpha_2}}{\lambda\sqrt{\pi}} \int_0^\tau \frac{\varphi(\tau^*)}{\sqrt{e^{2\omega(\tau-\tau^*)} - 1}} \times \\ \times \exp\left\{ \frac{\omega x^2}{2\alpha_2 [1 - e^{2\omega(\tau-\tau^*)}]} \right\} d\tau^*. \quad (12)$$

Для определения функции плотности потока $\varphi(\tau)$ воспользуемся соотношением (5):

$$\int_0^\tau \varphi(\tau^*) \left\{ \frac{\sqrt{\alpha_1}}{\lambda_1 \sqrt{\tau - \tau^*}} + \frac{\sqrt{2\alpha_2\omega}}{\lambda_2 \sqrt{e^{2\omega(\tau-\tau^*)} - 1}} \right\} dt = \sqrt{\pi} t_0. \quad (13)$$

Таким образом, температурное поле двух полуограниченных тел, одно из которых подвергается пластической деформации с постоянной скоростью ω (рис. 1, а), описывается выражениями (9) и (12). Плотность теплового потока на контакте данных тел удовлетворяет интегральному уравнению (13), которое численно решается с помощью метода сеток [3].

Рассмотрим на конкретном примере особенности формирования температуры контакта и температурного градиента в сечении $x = 0$ (рис. 1, а). Предположим, что инструмент выполнен из стали Р6М5, для которой теплопроводность $\lambda_1 = 33 \cdot 10^{-2}$ Вт/мм $^\circ$ С и коэффициент температуропроводности $\alpha_1 = 8,95$ мм 2 /с, а заготовка – из стали 08кп ($\lambda_2 = 48 \cdot 10^{-2}$ Вт/мм $^\circ$ С, $\alpha_2 = 13,1$ мм 2 /с) [4]. Подставляя значения $\lambda_1, \lambda_2, \alpha_1$ и α_2 в уравнения (9), (12) (13) и решая эти уравнения, получим зависимости температуры на контакте инструмента и заготовки, а также градиента температуры вдоль оси x в инструменте и заготовке от времени τ и скорости деформации ω . Результаты представлены на рис. 2, а, б, где $\theta_k = t_k / t_0$ – относительная температура на контакте. Сплошные линии кривых 1, 2, 3 соответствует процессу сжатия заготовки, а штриховые – гипотетическому растяжению.

На рис. 2 показано, что пластическая деформация оказывает значительное влияние и на температуру контакта (в сечении $x = 0$), и на температурный градиент. В частности, наблюдается существенное изменение температуры контакта в начальный период ($\tau = 0,5-5,0$ с) взаимодействия инструмента с деформируемой заготовкой (рис. 2, а). Увеличение скорости деформации ω от 1 с^{-1} до 5 с^{-1} влечет за собой заметное изменение относительной температуры на контакте инструмента и заготовки, при этом в случае сжатия ($\epsilon < 0$) относительная температура на контакте с течением времени возрастает, а в случае гипотетического растяжения ($\epsilon > 0$) – убывает.

Из рис. 2, б видно, что температурный градиент с увеличением скорости деформации также увеличивается при сжатии ($\epsilon < 0$) и уменьшается при гипотетическом растяжении ($\epsilon > 0$).

На рис. 2, а при $\omega \rightarrow 0$ кривые зависимостей температуры на контакте от скорости деформации приближаются к горизонтальной прямой 1, соответствующей отсутствию пластической деформации. Следовательно, при $\omega \rightarrow 0$ из уравнения (12) и (13) следует известное решение тепловой задачи для двух взаимодействующих при идеальном контакте тел [4].

Таким образом, при рассмотрении вопросов теплопередачи в процессах деформирования с малыми скоростями тепловую модель заготовка – инструмент можно упростить и рассматривать системы недеформируемых тел.

Исследование влияния прослойки смазки на условия теплопередачи через границу заготовка – инструмент. Рассмотрим процесс теплопередачи в системе полуграниченных тел, взаимодействующих при наличии межконтактных смазочных прослоек (рис. 1, б). Пусть первое тело имитирует инструмент, а его прослойка толщиной R_n – технологическую смазку и шерохова-

тость поверхности. Второе тело имитирует заготовку, его прослойка толщиной R_3 – окислы и шероховатость поверхности. Предположим, что источники тепла в процессе деформации заготовки не возникают, а теплообмен между телами осуществляется посредством теплопроводности.

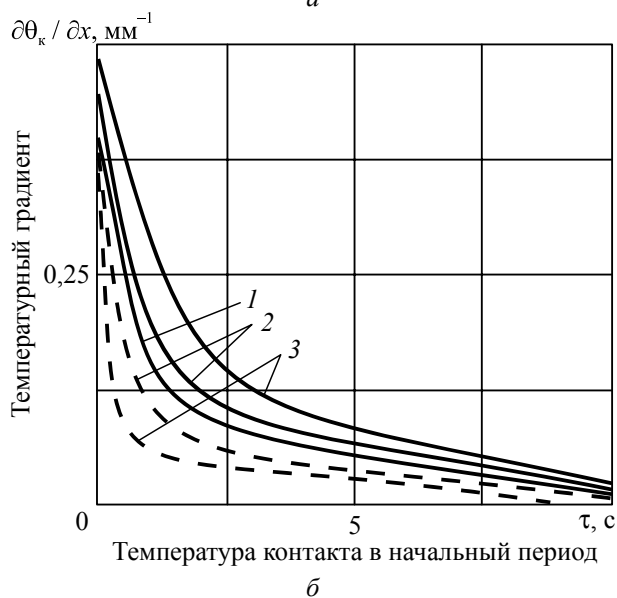
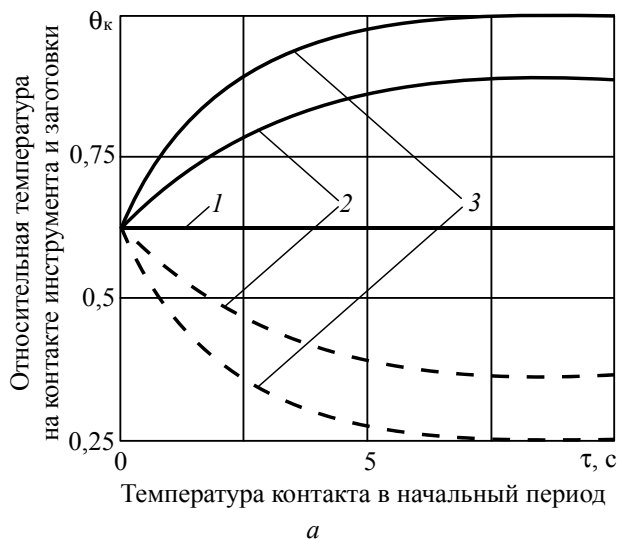


Рис. 2. Зависимость относительной температуры на контакте инструмента и заготовки θ_k (а), и температурного градиента $\partial\theta_k / \partial x$ (б) от скорости деформации ω (с^{-1}):
1 – $\omega = 0$; 2 – $\omega = 1$; 3 – $\omega = 5$

Начало координат 0 разместим на оси x на границе контакта прослоек 3 и 4 (рис. 1, б). Тогда условие задачи математически запишем следующим образом:

$$\frac{\partial t_3^{np}}{\partial \tau} = \alpha_3^{np} \frac{\partial^2 t_3^{np}}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0, -R_3 < x < 0); \quad (14)$$

$$\frac{\partial t_3}{\partial \tau} = \alpha_3 \frac{\partial^2 t_3}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0, -R_3 > x); \quad (15)$$

$$\frac{\partial t_n^{\text{np}}}{\partial \tau} = \alpha_n^{\text{np}} \frac{\partial^2 t_n^{\text{np}}}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0, 0 < x < R_n); \quad (16)$$

$$\frac{\partial t_n}{\partial \tau} = \alpha_3 \frac{\partial^2 t_n}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0, -R_n < x); \quad (17)$$

$$t_3^{\text{np}}(x, 0) = t_0^3(x, 0); \quad (18)$$

$$t_n^{\text{np}}(x, 0) = t_0^n(x, 0); \quad (19)$$

$$t_3^{\text{np}}(-R_3, \tau) = t_3(-R_3, \tau); \quad (20)$$

$$\lambda_3^{\text{np}} \frac{\partial t_3^{\text{np}}(-R_3, \tau)}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial t_3(-R_3, \tau)}{\partial x}; \quad (21)$$

$$t_n^{\text{np}}(R_n, \tau) = t_n(R_n, \tau); \quad (22)$$

$$\lambda_n^{\text{np}} \frac{\partial t_n^{\text{np}}(R_n, \tau)}{\partial x} = \lambda_n \frac{\partial t_n(R_n, \tau)}{\partial x}; \quad (23)$$

$$t_3^{\text{np}}(0, \tau) = t_n^{\text{np}}(0, \tau); \quad (24)$$

$$\lambda_3^{\text{np}} \frac{\partial t_3^{\text{np}}(0, \tau)}{\partial x} = \lambda_n^{\text{np}} \frac{\partial t_n^{\text{np}}(0, \tau)}{\partial x} = q(\tau); \quad (25)$$

$$\frac{\partial t_n(+\infty, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t_3(-\infty, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (26)$$

Здесь величины с индексом «з» относятся к заготовке, «и» – инструменту, «пр» и «з» – прослойке на заготовке, «пр» и «и» – прослойке на инструменте; $q(\tau)$ – функция плотности теплового потока на контакте взаимодействующих тел, подлежащая определению.

Граничное условие (16) позволяет вести расчет температурных полей рассматриваемой многокомпонентной системы методом редукции, предусматривающим расчленение системы тел на две составляющие (заготовка – прослойка и инструмент – прослойка), а затем нахождение для каждой из них аналитического решения. Эти решения, полученные применением преобразования Лапласа по переменной τ и системы дифференциальных уравнений в частных производных (14)–(17) и краевым условиям (18)–(26), имеют вид:

$$t_3^{\text{np}}(x, \tau) = t_0^3 + \frac{\sqrt{\alpha_3^{\text{np}}}}{\lambda_3^{\text{np}} \sqrt{\pi}} \times \int_0^\tau q(\tau^*) \sum_{n=1}^{\infty} (-h_3)^{n-1} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau^*}} \times \left\{ \exp \left[-\frac{[2(n-1)R_3 - x]^2}{4\alpha_3^{\text{np}}(\tau - \tau^*)} \right] - h_3 \exp \left[-\frac{(x + 2nR_3)^2}{4\alpha_3^{\text{np}}(\tau - \tau^*)} \right] \right\} d\tau^*; \quad (27)$$

$$t_3(x, \tau) = t_0^3 + \frac{2\sqrt{\alpha_3^{\text{np}}}}{\lambda_3^{\text{np}}(1+k_3)\sqrt{\pi}} \times$$

$$\int_0^\tau q(\tau^*) \sum_{n=1}^{\infty} (-h_3)^{n-1} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau^*}} \times$$

$$\times \left\{ \exp \left[-\frac{\left[(2n-1)R_3 \sqrt{\frac{\alpha_3}{\alpha_3^{\text{np}}}} - x - R_3 \right]^2}{4\alpha_3(\tau - \tau^*)} \right] \right\} d\tau^*; \quad (28)$$

$$t_n^{\text{np}}(x, \tau) = t_0^n - \frac{\sqrt{\alpha_n^{\text{np}}}}{\lambda_n^{\text{np}} \sqrt{\pi}} \times$$

$$\int_0^\tau q(\tau^*) \sum_{n=1}^{\infty} (-h_n)^{n-1} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau^*}} \times$$

$$\times \left\{ \exp \left[-\frac{[2(n-1)R_n - x]^2}{4\alpha_n^{\text{np}}(\tau - \tau^*)} \right] - h_n \exp \left[-\frac{(2nR_n - x)^2}{4\alpha_n^{\text{np}}(\tau - \tau^*)} \right] \right\} d\tau^*; \quad (29)$$

$$t_n(x, \tau) = t_0^n - \frac{2\sqrt{\alpha_n^{\text{np}}}}{\lambda_3^{\text{np}}(1+k_n)\sqrt{\pi}} \times$$

$$\int_0^\tau q(\tau^*) \sum_{n=1}^{\infty} (-h_n)^{n-1} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau^*}} \times$$

$$\times \left\{ \exp \left[-\frac{\left[x - R_n + (2n-1)R_n \sqrt{\alpha_n / \alpha_n^{\text{np}}} \right]^2}{4\alpha_n(\tau - \tau^*)} \right] \right\} d\tau^*; \quad (30)$$

где τ^* – переменная интегрирования,

$$h_3 = \frac{k_3 - 1}{k_3 + 1}; \quad h_n = \frac{k_n - 1}{k_n + 1};$$

$$k_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_3^{\text{np}}} \sqrt{\frac{a_3^{\text{np}}}{a_3}}; \quad k_n = \frac{\lambda_n^{\text{np}}}{\lambda_n} \sqrt{\frac{a_n^{\text{np}}}{a_n}}.$$

Для определения неизвестной функции плотности теплового потока на основании граничного условия (24) получаем следующее интегральное уравнение:

$$\int_0^{\tau} q(\tau^*) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} (-h_3)^{n-1} \frac{\sqrt{\alpha_3^{np}}}{\lambda_3^{np} \sqrt{\tau - \tau^*}}, \\ \exp\left(-\frac{(n-1)^2 \cdot R_3^2}{\alpha_3^{np} (\tau - \tau^*)}\right) - \\ -h_3 \exp\left(-\frac{(nR_3)^2}{\alpha_3^{np} (\tau - \tau^*)}\right) \end{array} \right\} - \quad (33)$$

$$\sum_{j=1}^i q_j B_{ij} = \sqrt{\pi} (t_0^3 - t_0^n),$$

где B_{ij} – интегралы, стоящие в левых частях уравнения (32), для которых $q(\tau^*) = 1$.

Решение системы алгебраических уравнений (33) имеет вид:

$$q_1 = \sqrt{\pi} (t_0^3 - t_0^n) B_{1j}^{-1};$$

$$q_i = B_{ij}^{-1} \left[\sqrt{\pi} (t_0^3 - t_0^n) - \sum_{j=1}^i q_j B_{ij} \right], \quad i = 2, 3. \quad (34)$$

$$\left. \begin{array}{l} (-h_n)^{n-1} \frac{\sqrt{\alpha_n^{np}}}{\lambda_n^{np} \sqrt{\tau - \tau^*}}, \\ \exp\left(\left(-\frac{(n-1)^2 R_n^2}{\alpha_n^{np} (\tau - \tau^*)}\right)\right) - \\ -h_n \exp\left(\frac{(nR_n)^2}{\alpha_n^{np} (\tau - \tau^*)}\right) \end{array} \right\} d\tau^* =$$

$$= \sqrt{\pi} (t_0^3 - t_0^n). \quad (31)$$

Полученное интегральное уравнение решаем численно на основании следующего алгоритма. Разобьем отрезок интегрирования от точки $\tau_i = ih, i = 1, N, h = T/N$ и, полагая в (31) $\tau = \tau_i$, находим:

$$\sum_{j=1}^i \int_{\tau_{j-1}}^{\tau_j} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} \frac{q(\tau^*)}{\sqrt{\tau_i - \tau^*}}, \\ (-h_3)^{n-1} \frac{\sqrt{\alpha_3^{np}}}{\lambda_3^{np}} \left[\exp\left(-\frac{(n-1)^2 R_3^2}{\alpha_3^{np} (\tau_i - \tau^*)}\right) - \right. \\ \left. -h_3 \exp\left(-\frac{n^2 R_3^2}{\alpha_3^{np} (\tau_i - \tau^*)}\right) \right] - \\ - (-h_n)^{n-1} \frac{\sqrt{\alpha_n^{np}}}{\lambda_n^{np}} \left[\exp\left(-\frac{(n-1)^2 R_n^2}{\alpha_n^{np} (\tau_i - \tau^*)}\right) - \right. \\ \left. -h_n \exp\left(-\frac{n^2 R_n^2}{\alpha_n^{np} (\tau_i - \tau^*)}\right) \right] \end{array} \right\} dt^* =$$

$$= \sqrt{\pi} (t_0^3 - t_0^n). \quad (32)$$

Будем считать значение $q(\tau^*)$ на каждом отрезке разбиения $[\tau_{j-1}, \tau_j]$ постоянным, т. е. $q(\tau^*) = g_i$ для $\tau \in [\tau_{j-1}, \tau_j]$, тогда (32) можно записать в виде:

Представленное решение тепловой задачи для многокомпонентной системы тел позволяет количественно оценить влияние прослоек на температурные изменения в системе заготовка – прослойка – инструмент.

Выясним особенности формирования температур t_k, t_n^{np} и t_3^{np} (где t_k – температура контакта) на следующем примере.

Предположим, что заготовка выполнена из стали 08кп, которая имеет следующие термофизические характеристики: $\lambda_3 = 48 \cdot 10^{-2}$ Вт/мм $^{\circ}$ С; $\alpha_3 = 13,1$ мм 2 /с, а инструмент из стали – Р6М5 ($\lambda_n = 33 \cdot 10^{-2}$ Вт/мм $^{\circ}$ С; $\alpha_n = 8,95$ мм 2 /с) [4]. Граничный слой заготовки (шероховатость поверхности, окислы) имеет практически те же термофизические характеристики, что и заготовка, а граничный слой инструмента – технологическую смазку со следующими значениями термофизических характеристик: $\lambda_n^{np} = 19 \cdot 10^{-2}$ Вт/мм $^{\circ}$ С, $\alpha_n^{np} = 5$ мм 2 /с [5].

Представленные на рис. 3 а, б расчетные данные показывают, что относительные температуры на границах заготовка – прослойка $\theta_3^{np} = t_3^{np}/t_0^3$ (рис. 3, а) и инструмент – прослойка $\theta_n^{np} = t_n^{np}/t_0^n$ (рис. 3, б) зависят не только от суммарной толщины контактируемых тел ($R_3 + R_n$), но и от соотношения их толщин – $R_3/(R_3 + R_n)$ (рис. 3, а) и $R_n/(R_3 + R_n)$ (рис. 3, б).

Причем зависимости этих температур от соотношения толщин прослоек наиболее сильно проявляются в скоростных процессах деформации на границе заготовка – прослойка, где теплофизические свойства обоих тел одинаковы (на рис. 3, а кривые 1 и 2, соответствующие времени контакта тел $t_1 = 0,005$ с и $t_2 = 0,05$ с, значительно выше кривых 3, соответствующих $t_3 = 0,5$ с). Из рис. 3, б, видно, что на контакте инструмент – прослойка имеет место обратный эффект, что объясняется более низкими теплофизическими свойствами технологической смазки, в которой как бы «гасятся» кратковременные повышения температуры. Температура контакта, кроме того, зависит и от толщины смазочной прослойки: чем она тоньше (рис. 3, б кривые 1, 2, 3 – сплошные линии), тем выше температура контакта.

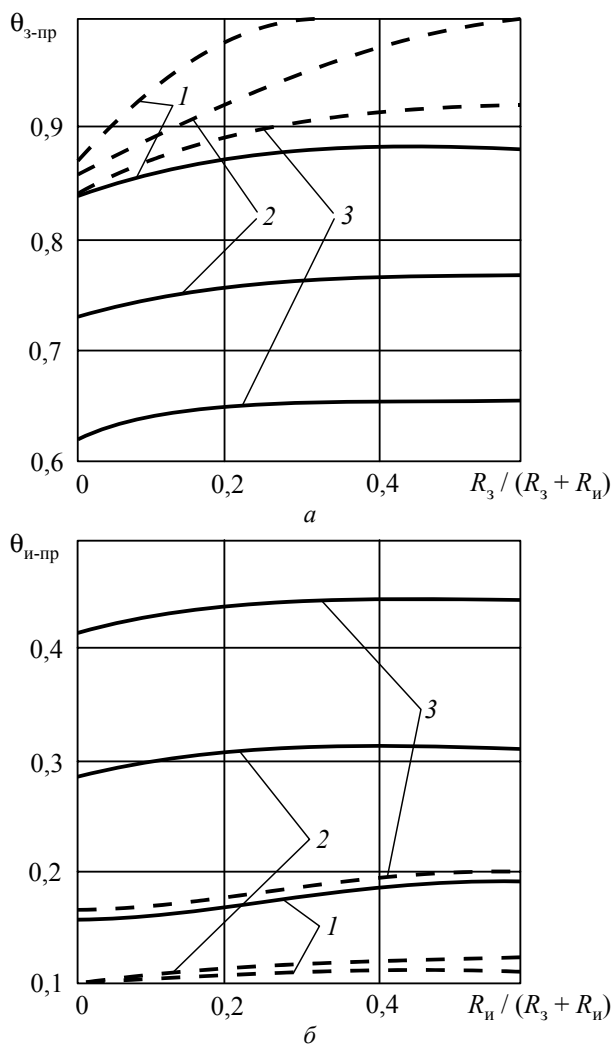


Рис. 3. Зависимость относительной температуры θ границ заготовка – прослойка (а) и инструмент – прослойка (б) от относительных толщин прослоек на заготовке (а) и инструменте (б); время контакта тел: 1 – $t_1 = 0,005$ с, 2 – $t_2 = 0,05$ с, 3 – $t_3 = 0,5$ с.
Сплошные линии – $R_3 + R_{ин} = 0,1$ мм,
штриховые – $R_3 + R_{ин} = 1$ мм

Заключение. При решении задачи теплообмена в системе заготовка – инструмент, с использованием теории теплопроводности для твердых тел и учетом пластической деформации, получены выражения, позволяющие количественно оценить влияние смазочных прослоек на температурные изменения в системе. Благодаря разработанной методике можно построить тепловые поля в заготовке и инструменте для реальных процессов холодного деформирования компактных материалов в зависимости от времени протекания процесса и теплофизических характеристик инструмента, заготовки и смазочных прослоек. Полученные результаты можно использовать при подборе эффективных смазочных композиций, предотвращающих схватывание заготовки и инструмента при высоких усилиях деформирования, обеспечивая получение высококачественных деталей.

Литература

1. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
2. Диткин, В. А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / В. А. Диткин, А. П. Прудников. – М.: Наука, 1974. – 542 с.
3. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М.: Наука, 2003. – 630 с.
4. Журавлев, В. Н. Машиностроительные стали: справочник / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – М.: Машиностроение, 1981. – 391 с.
5. Большаков, Г. П. Исследование смазок для холодного прессования / Г. П. Большаков, Г. В. Тищенко / Новое в кузнечно-штамповочном производстве: сб. тр. – М.: Машиностроение, 1964. – С. 119–129.

Поступила 14.03.2011