

УДК 62-977

## Новый подход в экспериментальном определении термического сопротивления зоны контакта инструмента с заготовкой\*

А. А. Полозин, Л. Шеффер, Д. Р. С. де Лима

*Ключевые слова:* горячая ковка, компьютерное моделирование, термическое сопротивление контакта, штамповка.

### Вступление

#### *Природа термического сопротивления контакта*

Оптимизация процесса обработки металла давлением, реализуемая нумерическими методами, базируется на точных данных об условиях обработки заготовки, а также на физических параметрах ее материала. Уменьшение температуры заготовки в результате того, что в процессе обработки она теряет тепло, провоцирует изменение всех механических свойств обрабатываемого материала. Наиболее значительные потери тепла при ковке происходят через зону контакта заготовки и инструмента.

Когда смежные поверхности инструмента и заготовки прижимаются друг к другу с усилием  $P$ , происходит передача тепла от тела с более высокой температурой к телу с меньшей температурой, то есть от заготовки к инструменту, а также в окружающую среду. Теплопередача между заготовкой и инструментом реализуется посредством трех процессов, действующих одновременно: конвекции, тепловой радиации и кондукционного потока тепла  $Q$  через контактную зону «инструмент — заготовка», который является наиболее значительным из них. Величина одномерного теплового потока  $Q$  определяется уравнением (1)

$$Q = (1/R)\Delta T A, \quad (1)$$

а также следующими общеизвестными уравнениями:

$$Q = mC_p(dT_{cp}/dt); \quad (2)$$

$$Q = \lambda(dT/dx), \quad (3)$$

\* Данное исследование выполнено при содействии и финансовой поддержке Национального комитета по развитию науки и технологии (CNPq) Бразилии.

где  $R$  — термическое сопротивление контакта «инструмент — заготовка»;  $\Delta T$  — абсолютная величина градиента температуры  $T$  на контакте;  $A$  — площадь контактной поверхности;  $m$  — масса тестируемого объекта — заготовки или инструмента;  $C_p$  — теплоемкость  $C$  материала тестируемого объекта при постоянном давлении  $P$ ;  $dT_{cp}/dt$  — скорость изменения средней температуры  $T_{cp}$  тестируемого объекта во времени  $t$  при контакте горячей заготовки с относительно холодным инструментом;  $\lambda$  — теплопроводность материала тестируемого объекта;  $x$  — координата числовой оси, совпадающей с направлением передачи тепла от заготовки к инструменту;  $dT/dx$  — абсолютная величина градиента температуры  $T$  по оси  $x$  в материале тестируемого объекта (заготовки или инструмента). Отсюда выводятся уравнения для определения термического сопротивления контакта:

$$R = \frac{\Delta T}{mC_p \frac{dT_{cp}}{dt}} A; \quad (4)$$

$$R = \frac{\Delta T}{\lambda(dT/dx)} A. \quad (5)$$

Следует заметить что уравнения (4) и (5) не являются равноценными в смысле получения конечного результата. Так, уравнение (4) считается малочувствительным к тонким тепловым процессам, протекающим в приповерхностном слое материала на границе контактной зоны. Впрочем, низкая чувствительность может быть компенсирована высокой точностью расчетов, основанных на надежных экспериментальных данных. Что же касается уравнения (5), то оно не учитывает инерционность протекающих в приповерхностном слое тепловых процессов (теплового удара).



**Экспериментальное определение термического сопротивления контакта**

В настоящее время известны следующие подходы [2] для определения величины  $R$ :

- нумерический: подбор оптимальной величины  $R$  путем многократных нумерических симуляций процесса горячей обработки материала давлением;
- экспериментальный: расчет  $R$  на основе экспериментальных данных.

Оба подхода не являются совершенными. Принципиальным недостатком нумерического подхода оказывается невозможность провести оценку надежности подобранного  $R$ , так как современные программы симуляции процесса горячей обработки материала давлением не показывают погрешность полученного результата. Основным недостатком экспериментального подхода является определение температуры контактной зоны косвенными методами, что отрицательно сказывается на точности вычисляемой величины  $R$ .

К сожалению, «многочисленные эксперименты, выполненные в последние десятилетия, не позволили выявить удовлетворительную корреляцию между величинами  $R$ , полученными для различных пар металлических материалов в различных условиях» [1]. Другими словами, величина  $R$ , выведенная исследователями для некоей термодинамической системы, характеризующейся набором определенных условий, непригодна для описания этой же системы, находящейся в других условиях или же для описания другой термодинамической системы.

С учетом изложенного становится очевидным то, что использование в компьютерных симуляциях значений  $R$ , опубликованных в литературе, требует величайшей осторожности. Желательность надежного определения  $R$  для каждого конкретного случая симуляции процесса горячей обработки материала давлением не вызывает ни малейшего сомнения.

**Новый подход к определению термического сопротивления контакта**

Новый подход базируется на следующих принципах, лишенных главных недостатков известных методов:

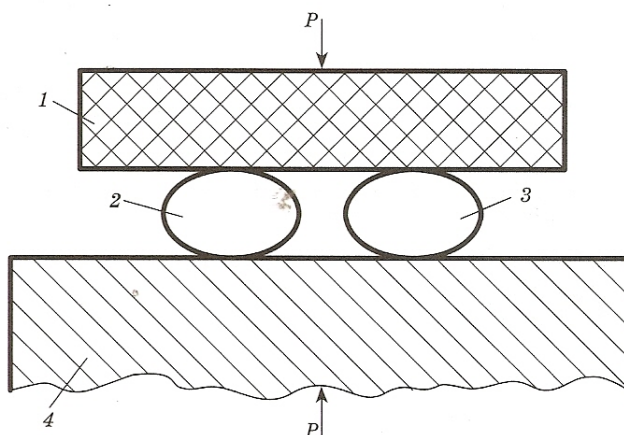
- отказ от подбора оптимальной величины  $R$ , основанного на компьютерных симуляциях процесса горячей обработки материала давлением;
- отказ от определения температуры контактной зоны косвенными методами;
- измерение температуры непосредственно в зоне контакта «инструмент — заготовка».

Что же касается вычисления параметра  $dT_{cp}/dt$  или же  $dT/dx$ , то оно выполняется в соответствии с традиционными экспериментальными методиками. По мнению исследователей, трудности с определением температуры контактной зоны (заготовки и инструмента) с помощью прямых измерений объяснялись технической невозможностью поместить в эту зону, для который характерны микроскопические размеры и высокие давления, термоэлектрический датчик, в простейшем виде представляющий собой два соединенных друг с другом проводника электричества из различных по химическому составу материалов. Решение проблемы измерения температуры контактных поверхностей было найдено путем помещения в контактную зону термоэлектрического датчика, состоящего из отдельных проводников неограниченно малой толщины.

**Способ измерения поверхностных и приповерхностных температур**

Способ измерения поверхностных температур в зоне контакта двух твердых тел учитывает термоэлектрический эффект и закон промежуточных проводников [3]. При этом измерение поверхностной температуры производится концом термометрической пары, представляющей собой два провода из различных металлических материалов, прижатых к тестируемой поверхности (рис. 1).

Электрическая связь (контакт) между проводами горячего конца термометрической пары обеспечивается электропроводящим материалом тестируемого металлического образца. Что же касается холодного конца этой пары, то электрическая связь между проводами



**Рис. 1.** Схема установки проводов на поверхность образца:

1 — электроизолирующая прокладка; 2, 3 — пара проводов; 4 — тестируемый образец



заложена в конструкцию прибора для измерения температуры.

Результаты измерения температуры двумя прижатыми к тестируемой поверхности проводами такие же, как если бы эта температура была измерена обычной термопарой. Однако термоэлектрическая система, показанная на рис. 1, обладает особыми достоинствами по сравнению с традиционной термопарой:

- Все элементы системы измерения поверхностной температуры устойчивы к высокому давлению, характерному для процесса горячейковки (штамповки);
- Максимальная измеряемая системой температура близка к температуре плавления материалов термометрической пары;
- Диаметр проводов может быть сколь угодно малым. Он способен обеспечивать надежную работу системы и не провоцировать заметных возмущений поверхностного температурного поля массивного тестируемого образца;
- Время отклика системы измерения поверхностной температуры равно времени прогрева/охлаждения поверхностного слоя провода, прижатого к тестируемому образцу и участвующего в генерации термоэлектрического потенциала.

Согласно многочисленным экспериментальным исследованиям [4 и др.], толщина приповерхностного слоя проволоки, обеспечивающего генерацию полноценного термоэлектрического сигнала, измеряется несколькими сотнями нанометров, а время прогрева/охлаждения этого слоя — единицами микросекунд. Практическая реализация способа определения поверхностных температур в контактной зоне, измеряемых посредством двух термометрических пар с отдельными проводниками [5], показана на рис. 2. Материалы проводов

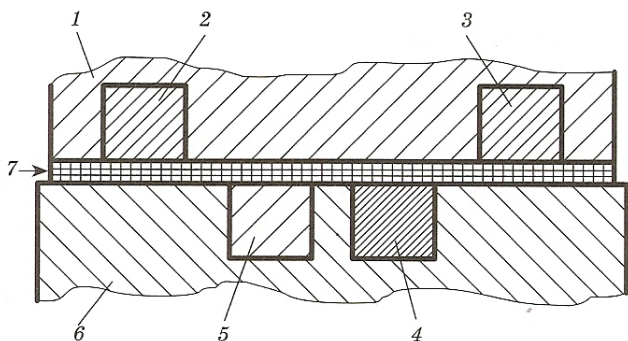


Рис. 2. Схема установки проводов для измерения температур в зоне контакта заготовки и инструмента:

1 — заготовка; 2, 3 и 4, 5 — пары проводов (хромель — алюмель) для измерения температуры заготовки и инструмента соответственно; 6 — инструмент; 7 — слой окислов

подбираются с учетом тех же требований, которые предъявляются в случае с традиционными термопарами. Диаметр проводов и, соответственно, глубина поверхностных каналов должны быть наименьшими.

### Главные особенности нового способа измерения температур

Температура, регистрируемая путем использования проводов малого диаметра, расположенных на поверхности металлического тестируемого тела (см. рис. 1), равна поверхностной температуре последнего. Температура, которую определяют с помощью проводов, находящихся в поверхностных каналах металлического тестируемого тела (см. рис. 2), соответствует его температуре на уровне, который меньше 50 % глубины этого канала [5, 6]. Следует подчеркнуть, что температура (термоэлектрическая электродвижущая сила), регистрируемая путем использования термометрических пар с отдельными проводниками, определяется геометрией термоэлектрических цепей, образуемых этими проводниками и материалами тестируемой пары тел.

В простейшем случае, схематически показанном на рис. 2, значительная толщина окисного слоя исключает электрический контакт инструмента и заготовки. Регистрируемые температуры равны температурам тестируемых поверхностей. В более сложном случае окисная пленка ничтожной толщины и прочности, образуемая, например, алюминием, разрушается при сжатии. В таких условиях термопара одного из тел (например, инструмента) формирует термоэлектрическую цепь не только с матрицей, но и с заготовкой. Поэтому регистрируемая температура будет выше поверхностной температуры матрицы и ниже поверхностной температуры заготовки. Для получения истинного значения поверхностной температуры понадобится коррекция величины зарегистрированной температуры. Методика корректировки последней описана в источниках [5, 6].

### Границы применения нового способа измерения температур

Предложенный способ можно использовать для измерения температуры в зоне контакта любой пары металлических тел. Способ был опробован при температурах 20–1250 °С и давлении до 31 МПа на контактных парах, чаще всего используемых при горячейковке («AISI H13 — ABNT 1045», «AISI H13 — AA6351», «AISI H13 — Ti6Al4V» и «AISI H13 — AM70»), и он обеспечил надежные измерения.



Таблица 1

Характеристики инструмента и заготовки

Тестируемое тело	Материал	Высота, мм	Диаметр, мм	Микрошероховатость, мкм	Масса, кг
Инструмент Заготовка	AISI H13	54,0	98,0	0,45	4,2
	ABNT 1045	59,8	95,0	1,0	3,28

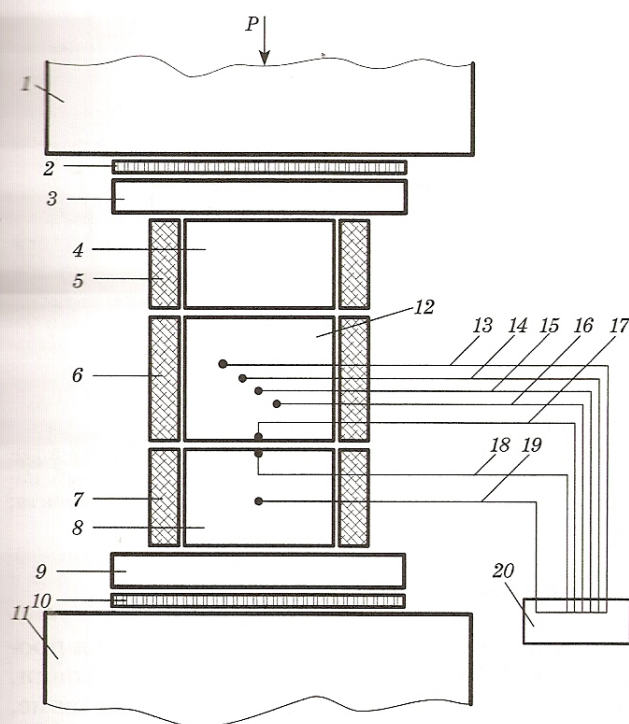


Рис. 3. Экспериментальная установка для регистрации температурных кривых термодинамической системы «инструмент — заготовка»:

1 — подвижная поперечина; 2, 10 — электроизолирующие прокладки; 3, 9 — опорные элементы инструмента; 4, 8 — матрицы; 5, 7 — термоизоляция; 6 — заготовка; 11 — стол пресса; 12 — заготовка; 13–16 — термопары типа «К» для регистрации (объемных) температур в теле заготовки на разном расстоянии от зоны контакта; 17, 18 — две пары проводов из хромеля и алюмеля для регистрации температуры в зоне контакта; 19 — термопара для регистрации (объемной) температуры в центре матрицы; 20 — устройство для регистрации температур; \* — отверстие для измерения температуры

Практическое применение нового способа измерения поверхностных и приповерхностных температур в зоне контакта «инструмент — заготовка» проиллюстрировано на примере контактной пары «AISI H13 — ABNT 1045». (Сталь AISI H13 соответствует инструментальной стали 4X5МФ1С, сталь ABNT 1045 — конструкционной стали 45).

### Определение *R* контактной пары «AISI H13 — ABNT 1045»

Для регистрации температурных кривых охлаждения заготовки и нагрева инструмента был проведен эксперимент. На практике большинство исследователей предпочитают регистрировать кривые охлаждения инструмента, а не заготовки [2]. Что же касается данного эксперимента, то в нем регистрировались кривые охлаждения заготовки. Такой выбор был сделан с учетом того, что существенно дешевле обходится образование отверстий, необходимых для установки термопар, в теле заготовке, а не инструменте.

Наиболее важные характеристики инструмента и заготовки приведены в табл. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки для регистрации температурных кривых показано на рис. 3.

### Подготовка инструмента и заготовки

На подготовительном этапе было необходимо закрепить термопарные провода в поверхностных каналах заготовки и инструмента, установить термоизолирующее кольцо на цилиндрической поверхности заготовки. Габаритные размеры каналов и проволоки приведены в табл. 2. Расположение проводов на контактной поверхности заготовки и инструмента показано на рис. 4, а, б соответственно.

### Нагрев заготовки и инструмента до температуры горячейковки

Нагрев заготовки, оснащенной термоизолирующим кольцом и парой проводов, проводили в электрической муфельной печи. Температура печи и заготовки повышалась от 23 до 1250 °С в течение 3 ч.

Инструмент нагревали путем обжаривания раскаленной болванки из инструментальной стали, нагретой в этой же печи до температуры 1100–1250 °С. После завершения нагрева рабочая поверхность инструмента покрывалась

Таблица 2

Габаритные размеры каналов и термопарной проволоки

Тестируемое тело	Канал, мм		Диаметр проволоки, мм
	Глубина	Ширина	
Инструмент	0,18	0,21	0,25
Заготовка*	0,20	0,23	0,25

\* Начальная глубина канала — 0,4 мм. Она уменьшилась до 0,15–0,20 мм за счет окисления поверхностного слоя заготовки при нагреве в печи.



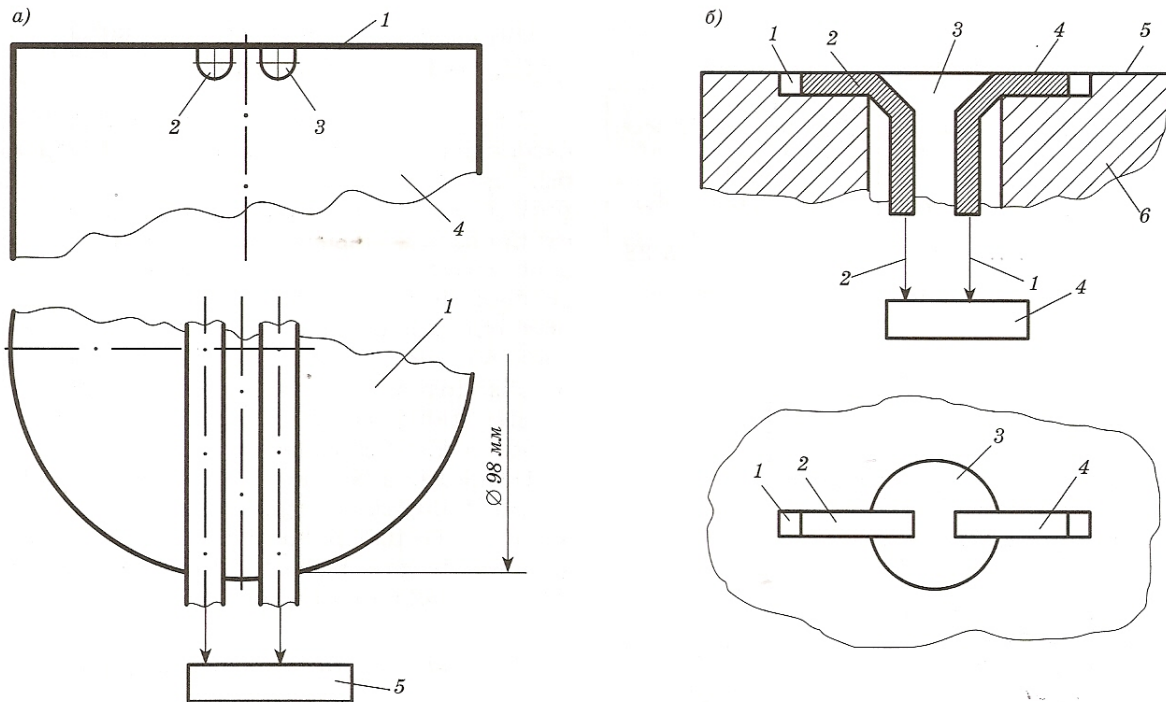


Рис. 4. Расположение проводов на контактных поверхностях:

а — стальной заготовки: 1 — контактная поверхность заготовки; 2 — провод из хромеля; 3 — провод из алюминия; 4 — заготовка; 5 — устройство для регистрации температур; б — инструмента: 1 — поверхностный канал; 2 — провод из хромеля; 3 — отверстие; 4 — провод из алюминия; 5 — рабочая поверхность инструмента; 6 — инструмент; 7 — устройство для регистрации температур

слоем графитовой смазки Aerodag G (Acheson do Brasil Indústria e Comércio, Бразилия).

Описание эксперимента

Нагретая заготовка устанавливалась между рабочими поверхностями инструмента (см. рис. 3), после чего к ней была приложена сила сжатия  $P$ , возрастающая от 0 до 155 кН и вызывающая пластическую деформацию заготовки. Температуру заготовки и инструмента контролировали с помощью четырех и одной термопар типа «К» соответственно. Для фиксации температуры контактной зоны использовали две пары проводов из хромеля и алюминия.

Температурные кривые заготовки и инструмента регистрировались измерительным прибором USB-TC (MicroDAQ.com, США). Начальные условия эксперимента приведены в табл. 3.

Таблица 3

Начальные условия эксперимента

Тестируемое тело	Температура, °C		
	средняя	контактных поверхностей	в центре тестируемого тела
Инструмент	—	265	180
Заготовка	1112	977	1134

Результаты эксперимента

Температурные кривые, полученные в процессе пластической деформации заготовки, показаны на рис. 5. Максимальное давление, приложенное к заготовке, равнялось 23,1 МПа. Абсолютная деформация заготовки составила 2,3 мм при средней скорости деформации  $2,3 \cdot 10^{-4}$  м/с, относительная деформация — 3,8 %. При этом толщина окисного слоя на торцах заготовки составила 0,2 мм, а потеря металла заготовки из-за ее окисления — 1,6 %.

Расчет величины  $R$  термодинамической системы «AISI H13 — ABNT 1045»

Расчет величины  $R$  производили по уравнению (2). Параметр  $dT_{cp}/dt$  определяли по локальным значениям температур заготовки (см. рис. 3, 5), измеренным термопарами в разных ее частях и в разные моменты времени.

Обработка экспериментальных результатов производилась при помощи компьютерной программы Microsoft Office Excel 2003. Уравнения для описания экспериментальных температурных кривых подбирались полиномами 3, 4 и 5-й степеней с высокоточными коэффициентами (24 знака после запятой). Расчетные



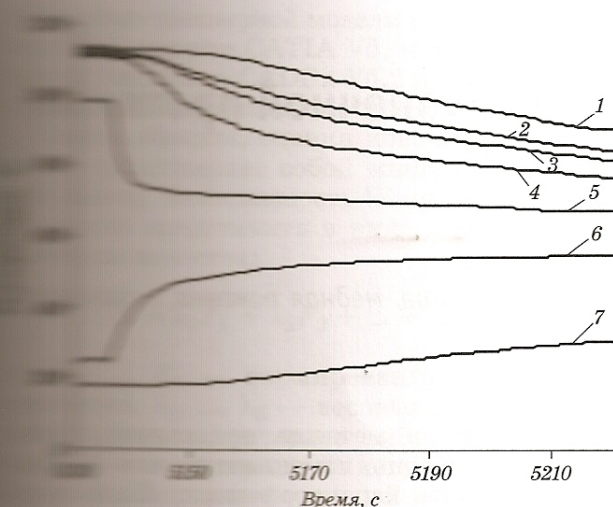


Рис. 4. Температурные кривые термодинамической системы «инструмент — заготовка»: 1 — центральная часть заготовки; 2-4 — зоны заготовки, расположенные между центром заготовки и поверхностью заготовки; 5 — поверхность заготовки; 6 — поверхность инструмента; 7 — центральная часть инструмента

Таблица 4

Полученные величины  $R$  термодинамической системы «инструмент — АБНТ 1045»

Положение датчика	Время, с	Температура, °C		
		контактной поверхности заготовки	контактной поверхности инструмента	средняя $T_{ср}$
1	424	977,0	251,1	1112,4
2	327	873,7	295,4	1107,4
3	388	808,6	332,1	1102,8
4	373	772,3	362,2	1098,3
5	211	766,2	386,9	1098,9
6	224	747,9	406,9	1089,4
7	205	740,9	423,1	1084,9
7	191	738,5	436,1	1080,3

величины  $R$  и соответствующие им параметры эксперимента приведены в табл. 4.

Полученные величины  $R$  находятся в интервале значений (29,8–645,2) м<sup>2</sup>·°C/Вт, предсказанном в исследовании [7] путем анализа усредненных величин тепловых потоков, характерных для процессов горячейковки. Погрешность расчетной величины  $R$  составила 4,6–5,5 %, что намного ниже погрешности 5–33 %, полученной в подобных экспериментах другими исследователями [2, 8, 9].

**Выводы**

Новый подход в определении термического сопротивления контакта «инструмент — заготовка» был успешно опробован на различных

металлических контактных парах, при этом значительно варьировали не только их физические и химические свойства, но и условия экспериментов. Подход основан на измерении температуры непосредственно в контактной зоне и отличается простотой конструктивного решения, а также высокой точностью результатов. Он может быть реализован различными способами с учетом особенностей установки проводов на тестируемой поверхности, выбора объекта (инструмента или заготовки) для регистрации его объемных температур и т. п. У этого подхода нет недостатков традиционных методик определения термического сопротивления контакта. Его можно рекомендовать как для инженерного, так и для научного использования.

**Литература**

1. Kreith F., Bohnt M. S. Princípios de transferencia de calor. 1 ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. P. 9.
2. Boutonnet A. S. Etude de la résistance thermique de contact à l'interface de solides déformables en frottement: application aux procédés de forgeage: Thèse: Lyon, 1998. / Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Режим доступа: <http://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.php?id=marchand>.
3. Manual on the use of thermocouples in temperature measurement. Special Technical Publication 470 B / American Society for the Testing of Materials. Philadelphia: ASTM, 1981. P. 13.
4. Bourg M. E., van der Veer W. E., Guell A. G. et al. Electrodeposited submicron thermocouples with microsecond response times // Nano Letters / American Chemical Society. 2007. N 7. P. 3208–3213.
5. Polozine A. Desenvolvimento da técnica analítica para determinar a resistência térmica de contato «material forjado — ferramenta» para o processo de forjamento: Tese de doutorado / Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2009. Режим доступа: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/15577/stats>.
6. Polozine A., Schaeffer L. Testing of thermocouples in the high gradient temperature field // Scientific Bulletins of Rzeszow University of Technology (Mechanics 73). 2008. Jun, N 253. P. 239–244.
7. Polozine A., Schaeffer L. Influence of the inaccuracy of thermal contact conductance coefficient on the weighted-mean temperature calculated for a forged blank // Journal of materials processing technology. 2008. N 195. P. 260–266.
8. Nshama J., Jeswiet P. H., Oosthuizen P. H. Evaluation of temperature and heat transfer conditions at the metal-forming interface // Journal of materials processing technology. 1994. N 45. P. 637–642.
9. Malinowski Z., Lenard J. G., Davies M. E. A study of the heat-transfer coefficient as a function of temperature and pressure // Journal of materials processing technology. 1994. N 41. P. 125–142.