



The article is dedicated to investigations connected with registration of temperature on the surface of rod articles received in the process of high-speed extrusion with cladding of end part. The results of investigations on determination of surfaces of temperature depending on the oscilloscope beam deflection are given.

И. В. КАЧАНОВ, В. Н. ШАРИЙ, БНТУ

УДК 320.4539.37

БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СКОРОСТНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ СТЕРЖНЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПЛАКИРОВАНИЕМ ТОРЦОВОЙ ЧАСТИ

Эффективность современного промышленного производства существенным образом зависит от разработки и создания новых высокопроизводительных, энерго- и ресурсосберегающих технологий. Важная роль при этом принадлежит инструментальному производству с его широкой номенклатурой продукции, выпускаемой как мелкими партиями (сериями), так и в единичных экземплярах. Основными задачами, стоящими перед инструментальным производством, являются повышение производительности труда, снижение себестоимости инструмента и повышение его стойкости, экономия используемых материалов.

Существующие в настоящее время способы изготовления штамповой оснастки неэкономичны, так как характеризуются высоким коэффициентом использования дорогостоящих инструментальных сталей и значительными припусками на механическую обработку. Несмотря на известные успехи в разработке и применении новых сталей, стойкость пресс-форм литья под давлением и штампового инструмента для горячего деформирования остается невысокой. Особенно это относится к литым штампам, низкая стойкость которых обусловлена неудовлетворительным качеством литой инструментальной стали и невысоким комплексом ее технологических, а также эксплуатационных свойств [1].

Изучение поведения литейной оснастки в процессе эксплуатации показало, что стойкость ее зависит от взаимодействия многих факторов. В частности, пресс-формы литья под давлением алюминиевых и медных сплавов выходят из строя в основном по причинам эрозионного разрыва и образования разгарных и магистральных трещин. При прочих равных условиях на работоспособ-

ность оснастки оказывает влияние также и высота отливки, с увеличением которой стойкость падает [2].

Формообразующие детали пресс-форм литья под давлением (вкладыши, вставки, стержни, раскататели) являются наиболее ответственными, так как они соприкасаются с жидким сплавом, в той или иной степени участвуют в оформлении поверхностей отливок и наиболее сильно подвергаются термическому воздействию и механическим нагрузкам. Как правило, эти детали целиком изготавливают из жаростойких сталей, обладающих высокими механическими свойствами. Для повышения износостойкости и уменьшения химического взаимодействия с заливаемым сплавом формообразующие детали подвергают термообработке, а их рабочие поверхности — цианированию, азотированию, фосфатированию и другим методам упрочнения. Однако основным недостатком рассмотренной технологии является ее трудо- и материалоемкость, а также невысокая стойкость рабочих частей [3].

Один из прогрессивных способов восстановления штамповой оснастки — электрошлаковый обогрев, заключающийся в наплавке инструментальных сталей на изношенные поверхности пресс-форм. Однако главный недостаток этого метода в настоящее время состоит в том, что получаемые таким методом заготовки требуют такой же механической обработки, как и деформированные кубики [1].

Как показывает опыт, большими потенциальными возможностями в решении существующих проблем обладает процесс скоростного горячего выдавливания стержневых изделий с плакированием торцовой части (СГВ с ПТЧ), позволяющий

за один удар получать высококачественные изделия с требуемой точностью размеров и формы.

Технология СГВ с ПТЧ является новой и заключается в получении стержневых изделий методом прессования в клиновых матрицах со сваркой плакирующего слоя и материала основы на конечной стадии процесса за счет пластического истечения металлов в радиальную полость матрицы, что позволяет получить значительную экономию высоколегированных инструментальных сталей (до 90%), повысить стойкость инструмента в 3–5 раз. Высокая эффективность технологии СГВ с ПТЧ при этом обусловлена возможностью обработки малопластичных и труднодеформируемых материалов с одновременным формированием в изделиях комплекса повышенных физико-механических и эксплуатационных свойств: высокой твердости (при нагреве) и ударной вязкости, сопротивления тепловому удару, способности не взаимодействовать с заливаемым металлом.

К настоящему времени достигнуты определенные успехи по использованию технологии СГВ с ПТЧ в сфере инструментального производства при получении заготовок под стержневой инструмент (пуансоны, прошивни, фрезы, электроды, долбяки), при изготовлении деталей пресс-форм литья под давлением (стержни, вставки, выталкиватели, клинья-пальцы и др.), подвергаемых воздействию высоких температур, быстрому нагреву и охлаждению.

Для промышленного внедрения технологии СГВ с ПТЧ необходимы сведения о тепловом эффекте в процессе выдавливания стержней.

Цель данной работы — исследовать повышение поверхностной температуры стержневых изделий на структуру и прочность шва в процессе СГВ с ПТЧ.

Скоростные процессы обычно сопровождаются интенсивным выделением теплоты и повышением температуры деформируемого металла. Интенсивность тепловыделения в процессах обработки металлов давлением определяется в основном скоростью деформации, соотношением температур заготовки и инструмента, теплоизоляционными свойствами смазки и степенью деформации [4]. С увеличением скорости деформации время, необходимое для получения образцом одной и той же степени деформации, уменьшается. Вследствие этого при постоянной скорости теплообмена изделия с окружающей средой все меньшее количество тепла успевает рассеяться в окружающую среду. Поэтому при скоростях деформации 10^3 – 10^4 с⁻¹, когда время деформации заготовки 300–900 мкс, а продолжительность стадии разгона 50–120 мкс, процесс можно считать адиабатическим. Исследование процесса скоростного горячего выдавливания стержневых изделий с плакированием торцевой части (СГВ с ПТЧ) в указанном диапазоне

скоростей деформации показало возможность получения точных изделий с высоким качеством поверхности и высококачественным швом по границе раздела плакирующего слоя (стали 9ХС, Х12МФ1, 5ХНМ, 5ХЗВЗМФС и т. д.) и материала основы (стали 45, 40Х). Проведение данного процесса в режиме высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) позволило существенно повысить механические свойства плакированных изделий. Однако необходимо учитывать, что у легированных сталей (плакирующий слой) узкие температурные интервалы деформирования и закалки, поэтому значительное повышение температуры в процессе деформации приводит к разрушению изделия по шву, а несоблюдение температурного режима закалки исключает получение высоких механических свойств в готовом изделии. Таким образом, для получения изделий методом СГВ с ПТЧ в режиме ВТМО крайне важно знать изменение температуры в очаге деформации и температурное поле в момент окончания процесса деформации.

Регистрация температуры внутри или на поверхности деформируемого металла в условиях скоростного выдавливания представляет собой сложную методическую задачу, которая на должном уровне не решена до настоящего времени. Основная трудность при разработке измерительной схемы заключается в достаточно обоснованном выборе датчика температуры. Если исходить из общепринятых требований, которым должны удовлетворять датчики температуры, то предельная частотная характеристика последних должна быть не ниже 200–400 кГц. Вызвано это, в первую очередь, необходимостью точной регистрации изменения температуры от исходного до пикового значения на стадии разгона, которая, как уже отмечалось, является сравнительно скоротечной (50–120 мкс).

Для оценки теплового эффекта в процессе прессования стальных прутков авторы работы [5] использовали метод калориметрирования. Однако этот метод не позволяет учесть характер распределения температуры по сечению и длине выдавленного стержня, что существенно ограничивает возможности анализа полученных результатов. Разогрев металла в области пластического течения при скоростном выдавливании образцов из меди и алюминиевого сплава АД1 в работе [6] определяли с помощью малоинерционных датчиков температуры — расщепленных термопар. Но результаты измерения с помощью термопар могут оказаться ошибочными вследствие нестабильности величины термо-ЭДС, тепловой инерции и деформации спая электродов [5].

Авторами работы [7] предложено в качестве датчика при измерении температуры на поверхности прутка, выдавленного на быстроходном гидрорессе, использовать фотодиоды ФД-3. Однако

предельная частотная характеристика фотодиодов ФД-3 существенно ограничена временем рассасывания неосновных носителей тока в «*p-n*»-переходе и составляет 10^5 Гц, что на порядок ниже требований, которым должна удовлетворять методика для регистрации температуры в процессе СГВ с ПТЧ.

Разработанная нами методика позволяет проводить регистрацию температуры в процессе деформации на поверхности стержневой части бесконтактным методом в реальном масштабе времени и с высокой точностью [4]. Повышение точности регистрации температуры обусловлено тем, что в качестве приемника теплового (инфракрасного) излучения в предлагаемой методике использовался фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-83. Анализ параметров ФЭУ-83 (предельная частота регистрируемых сигналов – 5–8 МГц; минимальное значение измеряемого интервала времени в исследуемом процессе – 10^{-7} – 10^{-8} с) [8] показывает, что они в полной мере отвечают тем требованиям, которые предъявляются к датчику температуры условиями скоростного формоизменения.

Общий вид датчика температуры, его конструктивная и оптическая схемы приведены на рис. 1, 2. Датчик температуры состоит из корпуса 1, центрирующих хомутиков 2, диафрагмы 3, фотоумножителя (ФЭУ-83) 4, фокусирующих линз 5, 6, оптической трубки 7. Чувствительным элементом, с помощью которого осуществляется регистрация инфракрасного излучения, в данной конструкции датчика является фотокатод 8. Выход инфракрасного излучения с боковой поверхности *A* стержня 9 на фотокатод 8 осуществляется через отверстие *B*, выполненное в калибрующем пояске за коническим участком матричной полости (рис. 2, б). Для регистрации температуры датчик устанавливается таким образом, что фокусное расстояние *f* линзы 5 находится на боковой поверхности *A* стержня 9. В то же время линза 6 по отноше-

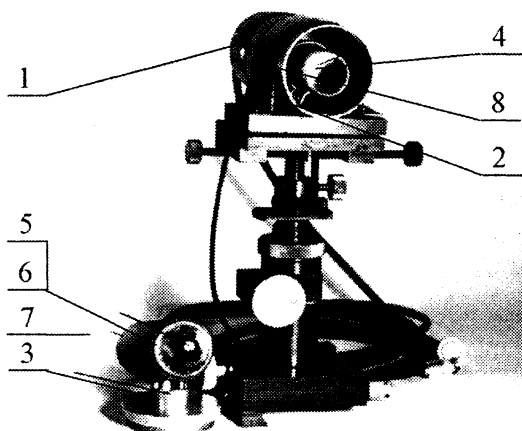


Рис. 1. Вид датчика температуры: 1 – корпус; 2 – центрирующие хомутики; 3 – диафрагма; 4 – ФЭУ-83; 5, 6 – фокусирующие линзы; 7 – оптическая трубка; 8 – фотокатод

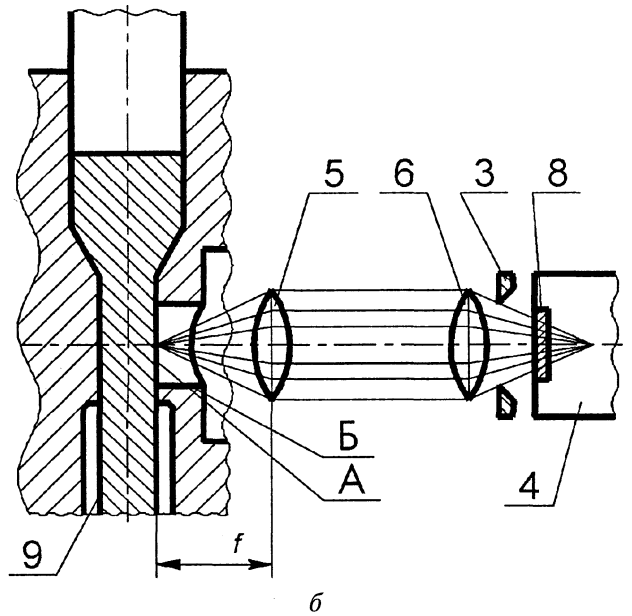
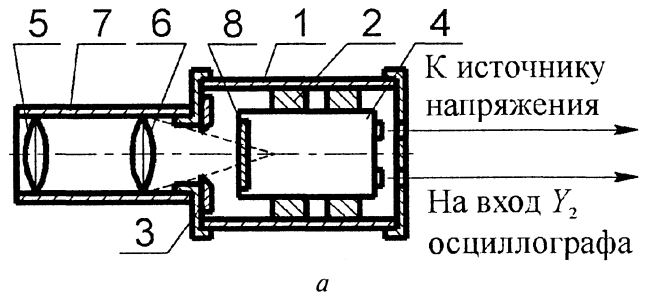


Рис. 2. Конструктивная (а) и оптическая (б) схемы датчика температуры

нию к фотокатоду 8 установлена с возможностью освещения его поверхности на 75–85% при полностью открытой диафрагме 3. Указанная расфокусировка оптической системы предохраняет фотокатод 8 от преждевременного разрушения.

Схема устройства для регистрации температуры (рис. 3) работает следующим образом. Пуансон 1, вылетающий из ствола установки 2, до соударения с заготовкой 3 перекрывает световой поток, направленный от источника 4 света на фотодиод 5. При затемнении фотодиода 5 на его выходе формируется импульс напряжения, который запускает ждущую развертку лучей и поступает на вход *У*1 осциллографа С1-18 [9].

Происходящее после запуска развертки лучей соударение пуансона 1 с заготовкой 3 сопровождается истечением деформируемого металла через очко матрицы 7. Образующийся при этом на выходе из матричного очка стержень 8 с высокой скоростью перемещается перед температурным датчиком 9. Возникающее в процессе истечения металла увеличение температуры на контактной поверхности стержневой части сопровождается адекватным изменением инфракрасного излучения, которое через отверстие *A* и систему линз (на рис.3 не показаны) выводится на фотокатод температурного датчика 9. Электрический сигнал,

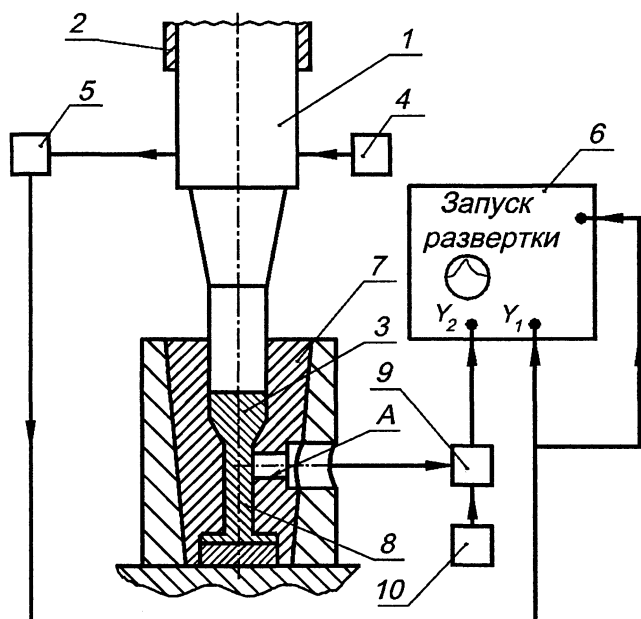


Рис. 3. Схема регистрации температуры на поверхности стержневой части изделия в процессе СВВ с ПТЧ

сформированный на выходе температурного датчика 9 при регистрации инфракрасного излучения от нагретой поверхности, поступает по экранированному кабелю на вход Y_2 осциллографа 6 и вызывает отклонение луча на его экране. Для обеспечения устойчивой работы фотоумножитель ФЭУ-83 запитывался постоянным напряжением $U=1-4$ кВ от источника 10, в качестве которого использовался источник стабилизированного напряжения ВС-23 [10].

Типичные температурные осциллограммы, полученные при срабатывании рассмотренной схемы, показаны на рис. 4, а, б. Причем осциллограмма, приведенная на рис. 4, а, характеризует изменение температуры на поверхности ($T_{\text{пов}}$) выдавленного стержня в функции времени процесса t . Для записи этой осциллограммы использовался закрытый вход осциллографа. На таком входе имеется емкость, что обеспечивает регистрацию только переменных компонентов электрического сигнала. Использование закрытого выхода позволяет оценить инерционность температурного датчика по наклону начального участка осциллограммы $T_{\text{пов}}(t)$. Анализ начального участка OK осциллограммы $T_{\text{пов}}(t)$ показывает, что он является вертикальным, а это позволяет сделать вывод о практической безынерционности фотоумножителя ФЭУ-83, используемого в качестве температурного датчика. В дополнение к сказанному следует отметить, что величина отрезка OK на рассматриваемой осциллограмме характеризует температуру в той точке боковой поверхности выдавленного стержня 8, которая первой попала в фокус температурного датчика 9 (см. рис. 3).

Регистрация температуры по закрытому входу осциллографа имеет одну особенность. В момент окончания процесса деформации в фокусе датчи-

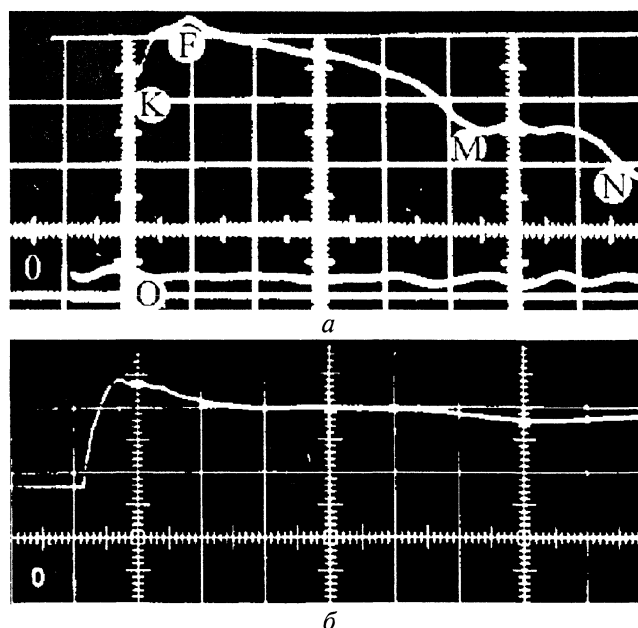


Рис. 4. Характер изменения температур $T_{\text{пов}}(t)$ (а) и $\Delta T_{\text{пов}}(t)$ (б) на боковой поверхности стержневой части в условиях скоростного выдавливания с плакированием; данные для расшифровки: скорость развертки луча $V=100$ мкс/см; $T_0=1180$ °С; $M=0,78$ кг; биметалл (сталь 45^л-сталь 5ХНМ); начальная скорость пуансона $V_0=92$ м/с

ка находится участок боковой поверхности стержня с некоторым конкретным значением температуры. Следовательно, на выходе датчика в этот момент устанавливается постоянный по величине электрический сигнал, который поступает на закрытый вход осциллографа. Однако емкость на входе в осциллограф этот сигнал не пропускает, в результате чего на осциллограмме $T_{\text{пов}}(t)$ можно отметить участок MN , характеризующийся интенсивным спадом. Однако этот спад обусловлен уже не изменением температуры $T_{\text{пов}}$, а возвращением луча в исходное горизонтальное положение ввиду отсутствия переменного сигнала на входе в осциллограф.

В ряде экспериментов для исключения влияния упомянутой емкости на характер изменения осциллограммы при регистрации сигнала с температурного датчика использовался открытый вход электронного осциллографа. На открытом входе емкость не устанавливается, что позволяет регистрировать на осциллографе как переменные, так и постоянные компоненты исследуемого электрического сигнала.

При проведении экспериментов с открытым входом осциллографа нами использовались предварительно обточенные по профилю матричной воронки образцы со стержневой частью. При установке такого образца после нагрева в матрицу на выходе температурного датчика сразу же появляется постоянное напряжение, под действием которого луч на экране смещается вертикально вверх. Такое положение луча соответствует исходной температуре T_0 образца перед деформацией. Последующая деформация образца приводит к

отклонению луча на экране, которое отражает уже изменение приращения температуры на поверхности $\Delta T_{\text{пов}}$ в функции времени t . Осциллограмма $\Delta T_{\text{пов}}(t)$, полученная с использованием открытого входа осциллографа, показана на рис. 4, б.

Применение открытого входа, как видно из рисунка, уже не приводит к отклонению луча на экране осциллографа в момент окончания процесса деформации.

При анализе процесса скоростного выдавливания значительный интерес представляют зависимости, которые отражают изменение температуры $T_{\text{пов}}$ на поверхности выдавленного стержня в

функции пути деформирования h . Для построения этой зависимости необходимо совместно рассмотреть осциллограммы $T_{\text{пов}}=f(t)$ и $h=f(t)$.

При рассмотрении этих осциллограмм следует учитывать то обстоятельство, что они во времени сдвинуты на отрезок Δt , в течение которого после соударения пуансона с заготовкой деформируемый металл заполняет матричную воронку. Поэтому совместное рассмотрение осциллограмм $T_{\text{пов}}=f(t)$ и $h=f(t)$ проводилось нами только на общем отрезке времени t' (рис. 5, а, б), что позволило его впоследствии исключить и построить зависимость $T_{\text{пов}}=f(h)$ (рис. 5, в).

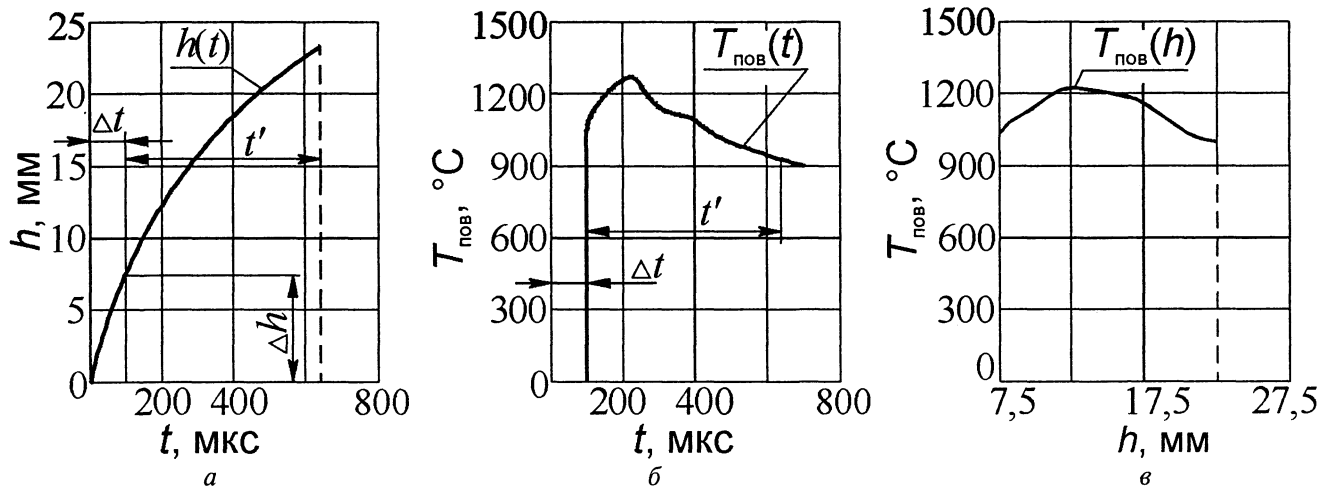


Рис. 5. Схема перестройки осциллограмм $h(t)$ “путь пуансона – время” (а) и $T_{\text{пов}}(t)$ “температура на поверхности – время” (б) в зависимость $T_{\text{пов}}(h)$ “температура на поверхности – путь пуансона” (в)

гораздо проще перестраиваются в функции пути деформирования h температурные осциллограммы, полученные по открытому входу осциллографа. Отметим, что в этом случае осциллограммы $\Delta T_{\text{пов}}=f(t)$ и $h=f(t)$ сразу же с момента соударения имеют общий параметр t , что позволяет его исключить и получить зависимость $T_{\text{пов}}=f(h)$.

С помощью уравнения неразрывности, которое связывает путь пуансона (h) и длину выдавленного стержня ($l_{\text{ст}}$), температурные зависимости $T_{\text{пов}}=f(h)$ и $\Delta T_{\text{пов}}=f(h)$ достаточно просто приводятся к типу $T_{\text{пов}}=f(l_{\text{ст}})$ и $\Delta T_{\text{пов}}=f(l_{\text{ст}})$.

Для расшифровки полученных осциллограмм строилась тарировочная кривая (рис. 6), представляющая собой зависимость отклонения луча h_n на экране осциллографа от известной температуры на поверхности $T_{\text{пов}}$ стержневой части образца, который устанавливался в матрицу. Положение образца в матрице при тарировке температурного датчика было аналогично тому, что показано на рис. 2, б. Контроль температуры на поверхности $T_{\text{пов}}$ проводился с помощью зачечаненных в образце хромельалюмелевых и платинородиевых термопар, подключенных к электронному потенциометру ЭПД-12.

Нагрев образцов для тарировки осуществлялся в электрической печи СНОЛ-2-УМ в условиях,

исключающих образование окалины на их поверхности. Для этой цели образцы устанавливались перед нагревом в специальный контейнер, засыпанный мелкоистолченным углем и только затем помещались в печь. Точки для построения тарировочных кривых брались как средние данные 5–6 опытов. При этом было установлено, что датчик температуры, основанный на использовании

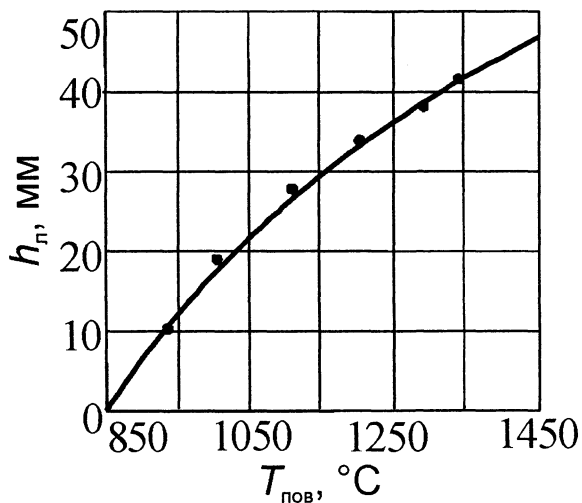


Рис. 6. Тарировочная кривая датчика температуры для расшифровки осциллограммы $h_n(T_{\text{пов}})$ “отклонение луча на экране осциллографа – температура на поверхности выдавливаемого стержня”

ФЭУ-83, характеризуется высокой стабильностью выходного сигнала при постоянном значении температуры. Средний разброс опытных данных не превышал 0,5–1,0% от верхнего значения измеряемой величины, что является свидетельством высокой точности и стабильности разработанной методики для регистрации поверхностной температуры.

Исследования, проведенные по регистрации температуры, показали, что адиабатические условия протекания процесса приводят к существенному разогреву металла, выходящего из очага деформации. Температура повышается по сравнению с исходным значением на 130–280 °С. При скоростном плакировании в твердом состоянии сталей соединение с высокой пластичностью возможно только при наличии в нем общих зерен без оксидных включений. При быстром нагреве даже в условиях, затрудняющих окисление, такое соединение без значительной пластической деформации осуществимо в сравнительно узком температурном интервале 1050–1250 °С. Однако нагрев до чрезмерно высокой температуры может понизить свойства соединения из-за ухудшения структуры, разупрочнения металла в зоне термического влияния и т. д. [11].

Влияние температуры на структуру соединения хорошо выявилось при скоростном плакировании встык стержней диаметром 20 мм из стали 45 (материал основы) и стали 5Х3В3МФС (плакирующий слой) за счет радиального истечения в штампе в матричную полость. Образцы нагревали в условиях ограниченного окисления до температуры $T=650-900$ °С и деформировали. В момент плакирования температура в зоне соединения достигала 840–1180 °С. В соединениях, сваренных при 850 °С (рис. 7, а), имелась сплошная цепочка оксидов. Общих зерен в стыке не было. Рядом с линией стыка наблюдались мелкие рекристаллизованные зерна, возможно как результат местной пластической деформации неровностей на торцах. Сварка при 910 °С выявила общие зерна; однако цепочка включений в стыке сохранилась (рис. 7, б). При дальнейшем повышении температуры сварки до 980 °С, лежащей существенно выше температуры $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, в стыке появились общие зерна, но разорванная цепочка включений сохранилась (рис. 7, в). Только в соединениях, сваренных при 1150 °С, стык металлографически не выявлялся; оксиды в нем исчезли либо в результате восстановления углеродом, либо при взаимодействии с газовой средой

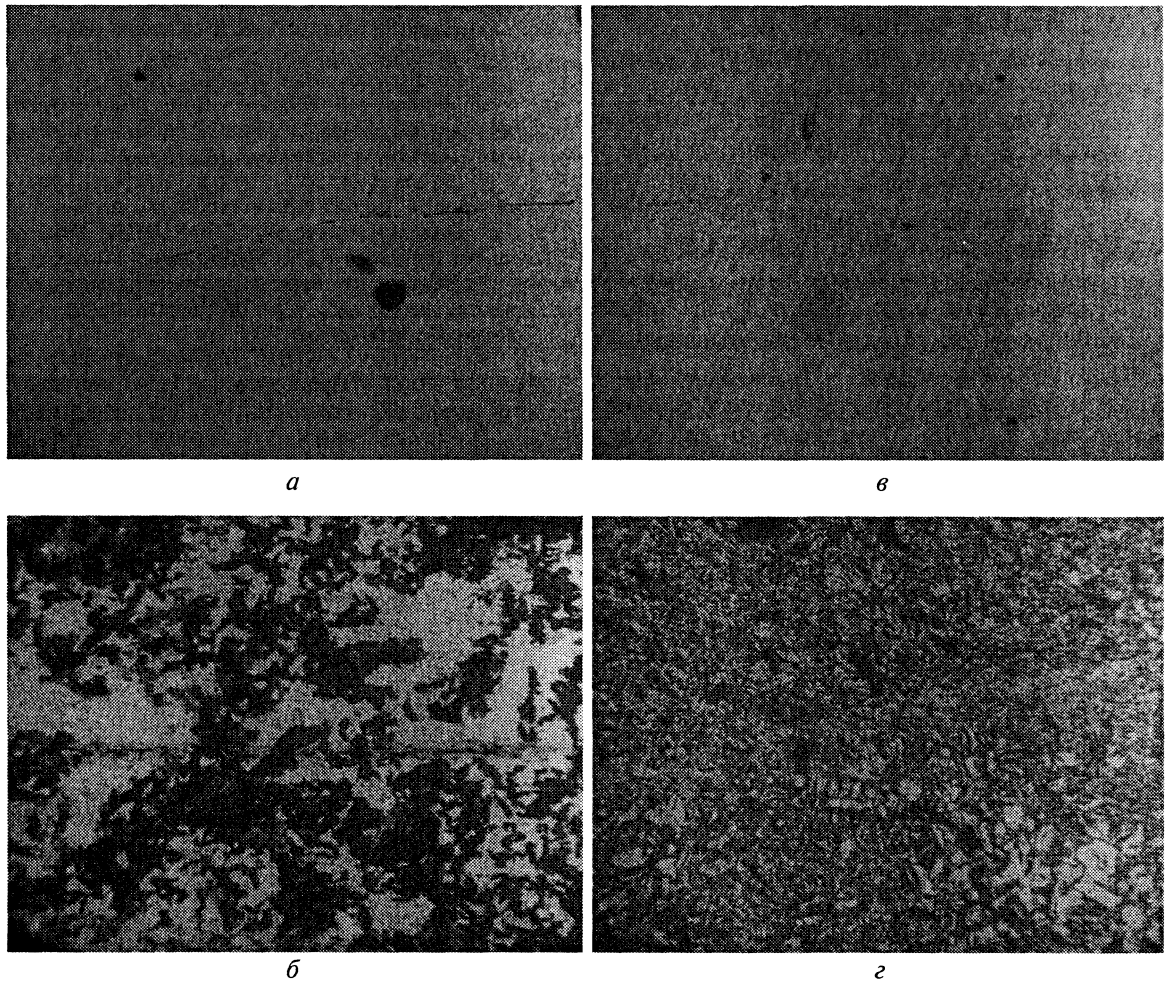


Рис. 7. Микроструктура соединения, выполненного при 850 °С (а); при 910 °С (б); при 980 °С (в); при 1150 °С (г), сталь 45 + сталь 5Х3В3МФС. х500

(рис. 7, з). Такой же характер структур наблюдался при плакировании в аналогичных условиях среднеуглеродистой стали 40X штамповой сталью 5ХНМ. Плакирование с образованием по границе раздела общих зерен уже обеспечивает удовлетворительную прочность соединений $\sigma_B=380-410$ МПа. Высокая же пластичность и ударная вязкость ($0,8-28 \cdot 10^4$ Дж/м²) достигались только в образцах с однородной микроструктурой стыка без оксидных включений (сваренных при 1150 °С).

Таким образом, изменения температуры в очаге деформации и температурного поля в момент окончания деформации в процессе скоростного выдавливания стержневых изделий с плакированием торца оказывают существенное влияние на свойства соединения.

Выводы

1. Для бесконтактного измерения поверхностной температуры при скоростном выдавливании стержневых изделий с плакированием торцевой части, реализуемого в диапазоне скоростей деформирования 60–130 м/с длительностью 300–900 мкс, разработана методика, основанная на использовании фотоэлектронного умножителя ФЭУ-83 с частотной характеристикой, равной 5–8 МГц, и минимальным значением измеряемого интервала времени в исследуемом процессе $10^{-7}-10^{-8}$ с.

2. Для регистрации поверхностной температуры разработана измерительная схема, обеспечивающая измерение начальной и текущей температуры поверхности при использовании в качестве регистратора осциллографа С1-18 с погрешностью, не превышающей 10%.

3. Получен тарировочный график $h_n(T_{пов})$ “ход луча – температура на поверхности”, позволяющий по отклонению луча осциллографа определять температуру на поверхности выдавленного образца в функции времени $T_{пов}(t)$ с последующим построением через уравнения неразрывности зависимостей $T_{пов}=f(l_{ср})$ “температура на поверхности – длина выдавленного стержня” и $\Delta T_{пов}=f(l_{ср})$ “приращение температуры на поверхности – время” в процессе скоростного выдавли-

вания стержневых изделий с плакированием торцевой части.

4. Установлено, что в процессе плакирования соединения высокого качества с общими зернами и без оксидных включений могут быть получены с нагревом в относительно узком интервале температур с учетом повышения температуры от радиально-направленной пластической деформации.

5. Технология СГВ с ПТЧ позволяет увеличить износостойкость стержневых деталей прессформ литья под давлением и является экономически эффективным способом изготовления штамповой оснастки.

Литература

1. Клещенко Г.И., Стефанович В.А., Тарновская О.Г. и др. Исследование механических свойств и структуры литых штамповых сталей для рабочих слоев технологической оснастки, восстановленной методом электрошлакового обогрева // *Литье и металлургия*. 2006. № 1. С. 119–124.
2. Ливенцев В.Е., Федулов В.Н. Способ восстановления технологической оснастки для горячего формования // *Литье и металлургия*. 2006. № 2. С. 198–200.
3. Беккер М.Б., Заславский М.Л., Игнатенко Ю.Ф. и др. *Литье под давлением*. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990.
4. Качанов И.В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / Под ред. Л.А. Исаевича. Мн.: УП «Технопринт», 2002.
5. Прозоров Л.В. Исследование величины теплового эффекта при горячем прессовании некоторых сплавов // *Кузнечно-штамповочное производство*. 1966. № 4. С. 7–11.
6. Ураков В.Ф. Исследование температурного эффекта при операциях выдавливания // *Машины и технология обработки металлов давлением*. М., 1969. № 128. С. 213–218.
7. Манегин Ю.В., Чернов А.Н., Тараненко Г.Н. Температура металла при прессовании на высокоскоростном гидравлическом прессе // *Сб. тр. ЦНИИ Черной металлургии*. М., 1967. Вып. 53. С. 87–89.
8. Игнатов А.Н. *Оптоэлектронные приборы и устройства: учеб. пособ. вузов по специальности «Телекоммуникации»*. М.: Эко-Трендз, 2006.
9. Козлячков В.К. Возможности цифрового осциллографа С1-18 // *Приборы и средства измерений: Электронный ресурс*. 2006. Режим доступа: <http://mni.pi.by/Articles.html>.
10. Заглубский А.А. *Оптические приборы // Фотоэлектронный умножитель: Электронный ресурс*. 2006. Режим доступа: http://lab2.phys.spbu.ru/book_zagr/ZAGR_2_7.PDF.
11. Гельман А.С. *Основы сварки давлением*. М.: Машиностроение, 1970.