

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И КОМПОНЕНТ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ МАТЕРИАЛА

*В.В. ЧЕРНОМАС*¹, доктор техн. наук, профессор
*Г.М. СЕВАСТЬЯНОВ*², канд. физ.-мат. наук
*А.М. СЕВАСТЬЯНОВ*³, канд. техн. наук
*С.В. БОНДАРЕНКО*², аспирант
¹КнАГТУ, г. Комсомольск-на-Амуре,
²ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре,
³АмГПГУ, г. Комсомольск-на-Амуре)

Поступила 19 января 2015

Рецензирование 10 февраля 2015

Принята к печати 15 февраля 2015

Черномас В.В. – 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет,
e-mail: userman10@mail.ru

Получение специальных видов проката из цветных сплавов с помощью совмещенных технологий литья и деформации является относительно новым ресурсосберегающим направлением в металлургии. В отечественной практике такие технологии реализованы в устройстве непрерывного литья и деформации металла. Ключевыми особенностями указанного устройства являются цикличность процесса и наличие больших необратимых деформаций заготовки (полосы прямоугольного сечения в замкнутом с четырех сторон подвижном кристаллизаторе). Эти особенности приводят к проблеме получения экспериментальных данных об энергосиловых параметрах деформирования, а также о распределении и интенсивности деформированного состояния заготовки. В данной работе предложена методика определения мгновенной мощности необратимого формоизменения с помощью косвенных измерений. Методика основана на регистрации и анализе изменения электрических характеристик двигателя привода в двух режимах работы установки: циклическом деформировании образца и движении узлов установки без деформирования образца. Предложен способ прямого измерения компонентов пластической деформации заготовки на базе метода накатанных делительных сеток с последующими расчетами по методике Зибеля. Результаты экспериментов свидетельствуют о наличии выраженного трехосного деформированного состояния заготовки в результате совместного действия удлинения и сдвигов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. На основе полученных экспериментальных данных проведена верификация программного пакета LS-DYNA при решении задачи стесненного сдвига, сопряженного с большими пластическими деформациями.

Ключевые слова: циклическое формоизменение, компоненты пластической деформации, интенсивность деформации, мощность необратимого формоизменения, инструмент деформации.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-33-41

Введение

При разработке технологических процессов получения металлоизделий совмещенными методами литья и обработки материалов давлением решающее значение имеет определение

рациональных параметров процесса, обеспечивающих гарантированное качество получаемых металлоизделий [1–4].

Известно, что при изготовлении металлоизделий с применением установки непрерывного

литья и деформации металла (УНЛДМ) деформирование металла в требуемый профиль поперечного сечения осуществляется с помощью подвижного составного кристаллизатора, который кроме функции теплоотвода, необходимого для кристаллизации металла, выполняет функцию инструмента его деформации [5–7]. На рис. 1 представлена конструктивная схема УНЛДМ (часть сечений элементов конструкции не показана). Установка имеет две плоскости симметрии – поперечную П1 и продольную П2 – и включает в себя охлаждаемый кристаллизатор, состоящий из двух подвижных боковых стенок 1 и двух подающих плит 2. Рабочие поверхности боковых стенок кристаллизатора имеют вертикальные калибрующие участки и наклонные участки обжатия материала металлоизделия в твердотелом состоянии, расположенные под углом к прямолинейным участкам. Каждая из боковых стенок закреплена на приводных эксцентриковых валах (пары 3 и 4), закрепленных в станине 5 с помощью подшипников качения, и приводится ими во вращательное движение. При этом каждая точка боковой стенки движется по круговой траектории относительно своего центра вращения в плоскости П2. Подающие плиты закреплены на станине с помощью плоских подшипников, приводятся в движение за счет эксцентриков, размещенных на нижней паре валов 4, и совершают вертикальное возвратно-поступательное движение. Такое взаимное

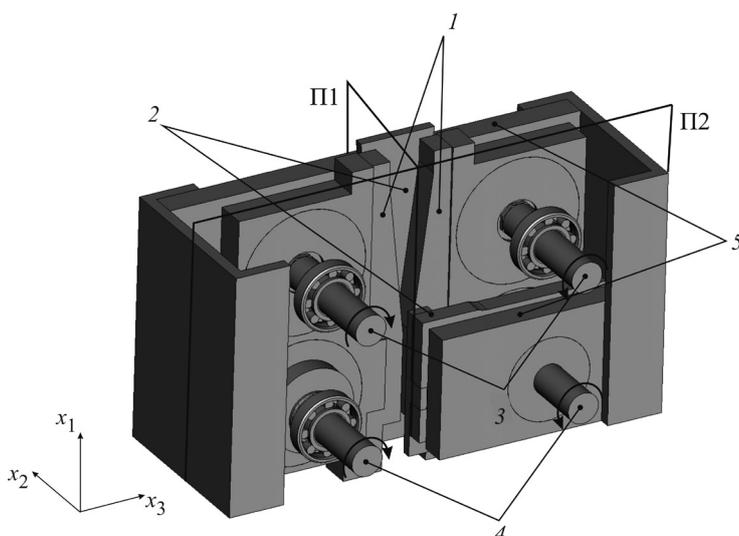


Рис. 1. Конструктивная схема УНЛДМ:

1 – боковые стенки (бойки); 2 – подающие плиты; 3, 4 – приводные эксцентриковые валы (верхняя и нижняя пара соответственно); 5 – станина

движение стенок кристаллизатора приводит к циклической деформации заготовки и ее подаче в зону калибрования. За счет противонаправленного вращения пар валов деформация материала заготовки происходит в результате механического давления боковых стенок кристаллизатора и в меньшей степени в результате сдвига подающими плитами.

Для реализации устойчивого процесса получения металлоизделий на УНЛДМ наряду с соблюдением температурных режимов кристаллизатора требуется разработка оптимальных условий процесса его пластического деформирования [8]. Определение этих параметров возможно только на основе анализа напряженно-деформированного состояния (НДС), формирующегося в металлической заготовке. Такой анализ в процессах, сопряженных с большими пластическими деформациями, связан с существенными трудностями как из-за отсутствия методик экспериментального определения НДС по толщине заготовки, так и из-за сложности получения его расчетных значений.

В этой связи определение деформированного состояния в формирующемся металлоизделии и энергосиловых параметров процесса на базе натурного моделирования является актуальным направлением исследования. Цель данной работы состоит в создании методик экспериментального определения средней мощности пластического деформирования и компонентов деформаций

в полосе прямоугольного сечения, подверженной необратимому циклическому формоизменению в замкнутом с четырех сторон подвижном кристаллизаторе УНЛДМ, а также в получении экспериментальных данных об указанных характеристиках и верификации на их основе программного комплекса LS-DYNA. Необходимость такой верификации обусловлена известной дискуссионностью вопроса выбора кинематических соотношений теории пластичности при больших деформациях [9].

Для получения данных о деформированном состоянии заготовки необходимо выбрать базовый экспериментальный метод, соответствующий условиям протекания исследуемого процесса (большие деформации, необходимость их измерения по толщине заготовки, а не только на ее поверхности,

труднодоступность металлоизделия в процессе деформирования). Наиболее известны следующие экспериментальные методы определения деформированного состояния: метод хрупких тензочувствительных покрытий [10], метод оптически чувствительных покрытий [10], методы голографии [11], метод делительных сеток [12]. Ввиду особенностей совмещенного процесса, протекающего на УНЛДМ, в частности из-за больших деформаций материала, не могут быть применены методы, основанные на нанесении на материал тонких покрытий (метод хрупких тензочувствительных покрытий, метод оптически чувствительных покрытий). Область применения группы голографических методов также ограничивается измерениями малых деформаций материала. Метод муаровых полос, несмотря на его определенные преимущества (использование в широком диапазоне температур и скоростей нагружения, наглядность, возможность измерения в зонах концентрации на малых базах), имеет достаточно высокую погрешность и трудоемок в применении. В контексте данного исследования наиболее подходит метод накатанных делительных сеток, который, однако, в базовом варианте пригоден только для измерения деформаций вблизи поверхности образца.

Для определения энергосиловых характеристик процессов обработки металлов давлением существует практика применения различных датчиков нагрузки. Однако, во-первых, цикличность рассматриваемого процесса и достаточно высокая величина угловых скоростей кругового движения инструмента деформации приводят к требованию малой инерционности измерительного оборудования. Во-вторых, технические особенности кристаллизатора УНЛДМ делают невозможной непосредственную установку датчиков в зону контакта инструмента с металлоизделием. Приемлемой альтернативой представляется идентификация механической мощности процесса формоизменения с помощью косвенных измерений (по электрическим характеристикам привода).

Методика исследования

Для экспериментального определения больших пластических деформаций в качестве базового метода исследования выбран метод

делительных сеток. Для оценки деформированного состояния во внутренних слоях материала предложено использовать трехслойные составные образцы. Материал – свинцово-сурьмяный сплав марки ССу [13], толщина каждого слоя 4 мм. На сопрягающиеся поверхности слоев наносится координатная сетка в виде квадратных ячеек размером 10×10 мм (глубина рисок 1 мм). Сборка слоев в составной образец осуществляется с помощью свинцовых заклепок диаметром 5 мм, расположенных по его периметру. Начальные условия при проведении экспериментов: температура заготовки 20 °С, температура инструмента 20 °С, смазка рабочих поверхностей инструмента, контактирующих с заготовкой, отсутствует. Максимальная степень обжатия образца в калибрующей зоне кристаллизатора составляет 50 %.

После проведения эксперимента составной образец разделяется на слои, и с помощью фотосъемки фиксируются искажения координатной сетки, нанесенной на поверхность каждого из слоев. Измерение искажения элементов координатной сетки проведено с помощью программы обработки цифровых изображений «Image Pro Plus 6.0». Расчет компонентов деформации, характеризующих истинное (логарифмическое) удлинение и сдвиг ячеек координатной сетки, проводится на основе методики Зибеля [14, 15].

Для идентификации энергосиловых параметров деформирования материала составными частями кристаллизатора УНЛДМ разработана методика, основанная на регистрации и анализе кривых нагрузки электродвигателя привода. На рис. 2 представлены внешний вид и принципиальная схема экспериментального стенда для проведения натурного моделирования.

В его состав входит электродвигатель постоянного тока Д812 У2 мощностью 75 кВт с обратной связью для регулирования частоты вращения вала двигателя, редуктор с четырьмя выходными валами и рабочая клетка кристаллизатора с приводными валами. В электрическую цепь двигателя установлен шунт калиброванный марки 75ШСМЗ-100А, электрический сигнал с которого (напряжение в электрической цепи) поступает на вход аналого-цифрового преобразователя, фиксируется и обрабатывается на ПЭВМ с помощью программы PowerGraph 2.1. Частота

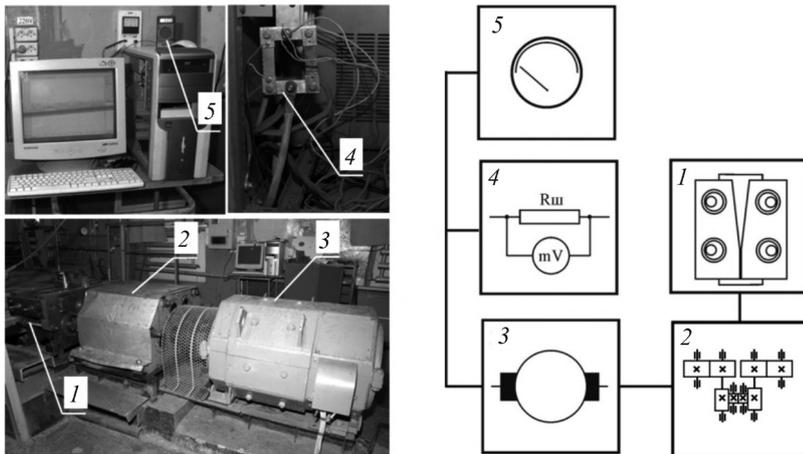


Рис. 2. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) экспериментального стенда для натурного моделирования процесса:

1 – клеть УНЛДМ; 2 – редуктор; 3 – двигатель; 4 – шунт; 5 – тахометр

вращения вала электродвигателя регистрируется с помощью электрического тахометра марки ТЭ-45, вращение равномерное с угловой скоростью, не зависящей от нагрузки.

Полный оборот приводных валов УНЛДМ состоит из двух этапов: этапа обжатия (рабочего хода) и этапа холостого хода. Этап обжатия начинается с момента захвата заготовки рабочими поверхностями боковых стенок и заканчивается в момент их максимального сближения. Этап холостого хода характеризуется отсутствием контакта рабочих поверхностей боковых стенок с заготовкой. На рис. 3 представлена кинематика подвижных частей кристаллизатора, за точку отсчета угла φ (нулевую отметку) принято полностью разведенное положение боковых стенок.

График $x_1(\varphi)$ – изменение вертикальной координаты центра масс подающих плит (нуле-

вому уровню соответствует нижнее положение плит). Полный ход плит – $2e_p$, где e_p – эксцентриситет участка вала, приводящего в движение подающие плиты. График $x_3(\varphi)$ – изменение горизонтальной координаты вертикального участка боковых стенок кристаллизатора (точка отсчета координаты – в плоскости симметрии П1). Здесь e_s – эксцентриситет участка вала, приводящего в движение боковые стенки; h_0 – половина расстояния между вертикальными участками боковых стенок при их полном сведении (т. е. $2h_0$ – толщина заготовки на выходе из кристаллизатора). Штриховкой на рис. 3 отмечен этап обжатия.

Уравнения движения $x_1(\varphi) = e_p(1 - \cos \varphi)$, $x_3(\varphi) = h_0 + e_s(1 + \cos \varphi)$. В рассматриваемых натуральных экспериментах конструктивные параметры имеют следующие числовые значения: $e_p = 10$ мм, $e_s = 3$ мм, $h_0 = 3$ мм.

Экспериментальные исследования проводятся следующим образом. Составной образец помещается в кристаллизатор УНЛДМ, боковые стенки которого предварительно устанавливаются в среднее положение ($\varphi = \pi/2$), соответствующее началу их рабочего хода. Затем включается привод составных частей кристаллизатора, при этом образец захватывается движущимися навстречу друг другу рабочими поверхностями боковых стенок, деформируется ими и продвигается в зону калибровки торцевыми стенками.

Результаты и обсуждение

В процессе деформации квадратные ячейки сетки трансформируются в криволинейные параллелограммы (рис. 4, а). Дальнейшие измерения проведены по полуосям r_1 и r_2 эллипсов, вписанных в деформированные ячейки сетки, точки касания эллипсов – середины сторон ячейки (рис. 4, б).

Осредненные результаты измерений искажений координатной сетки и расчетные компоненты деформации (главные линейные деформации) представлены в таблице. Для определения компонента ε_3 использовано соотношение пластической несжимаемости $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$. В качестве

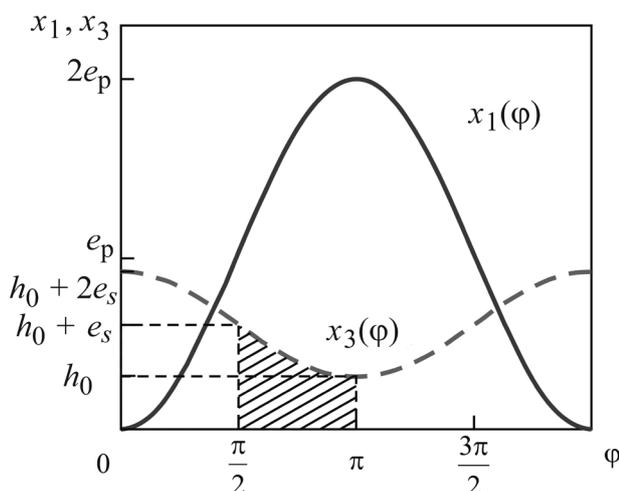


Рис. 3. Кинематика подвижных частей кристаллизатора

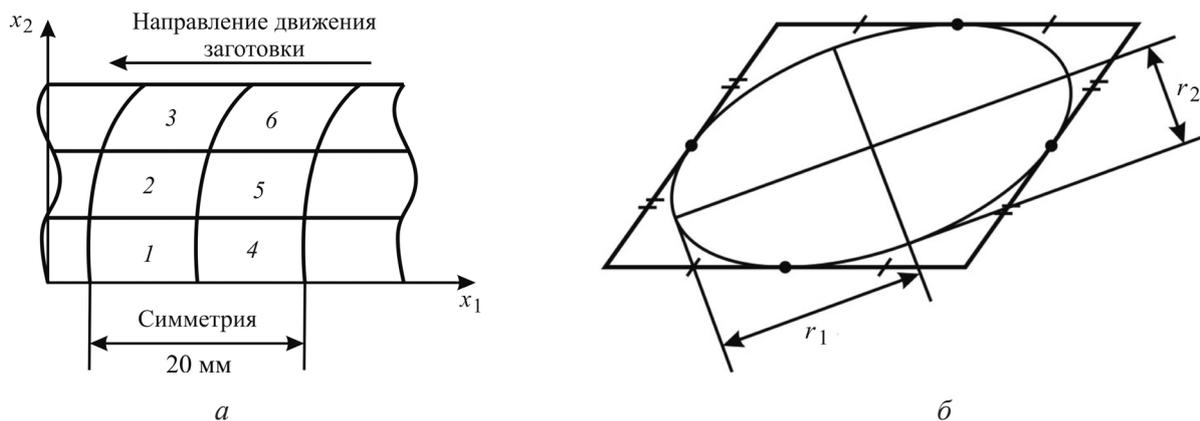


Рис. 4. К расчету компонентов деформации:

a – расположение ячеек координатной сетки; *б* – схема проведения измерений их искажения

характеристики деформированного состояния выбрана величина интенсивности пластической деформации $\Sigma = \sqrt{2/3} (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)^{1/2}$, также приведенная в таблице.

Расстояния между продольными линиями сетки остались практически неизменными, что свидетельствует о незначительной величине истинных удлинений (укорочений) ϵ_2 . Поперечные линии сетки претерпели существенное изменение и приобрели вид парабол с вершинами, находящимися в плоскости симметрии П1 заготовки. При этом рассчитанная величина ϵ_3 по модулю существенно превышает значение $\ln 0,5$ (теоретическую величину однородной деформации ϵ_3 в отсутствие трения на контактных поверхностях и, как следствие, искривления сеточных линий). Этот факт говорит о сильной неоднородности деформированного состояния

по толщине заготовки и значительных сдвиговых деформациях материала в плоскостях, параллельных П1.

Если пренебречь малой величиной деформации ϵ_2 , то схему деформирования образца в калибрующей части можно представить как результат совместного удлинения в направлении оси x_1 (со сжатием по оси x_3) и сдвигов в плоскостях, параллельных П1 и П2.

Экспериментальные данные электрического напряжения, зарегистрированного на калибрующем шунте в процессе циклической деформации образца, в виде дискретного сигнала приведены на рис. 5, *a*. Периодичность сигнала соответствует показаниям тахометра (180 оборотов вала в минуту).

На рис. 5, *б* представлен график, соответствующий сглаженному средствами Power-Graph 2.1 сигналу. Приведенные данные с учетом

Результаты измерений искажений координатной сетки и расчетов компонентов деформаций

Номер ячейки	Большая полуось эллипса r_1 , мм	Малая полуось эллипса r_2 , мм	Компоненты логарифмической деформации			Σ
			$\epsilon_1 = \ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right)$	$\epsilon_2 = \ln \left(\frac{r_2}{r_0} \right)$	$\epsilon_3 = -(\epsilon_1 + \epsilon_2)$	
1	13,0	$\Sigma 5,1$	0,96	0,02 Σ	$\Sigma -0,98$	1,12
2	12,2	4,8	0,89	-0,04	-0,85	1,01
3	12,5	4,6	0,92	-0,08	-0,84	1,02
4	12,6	5,1	0,92	0,02	-0,94	1,07
5	12,6	4,8	0,92	-0,04	-0,88	1,04
6	14,2	4,9	1,04	-0,02	-1,02	1,19

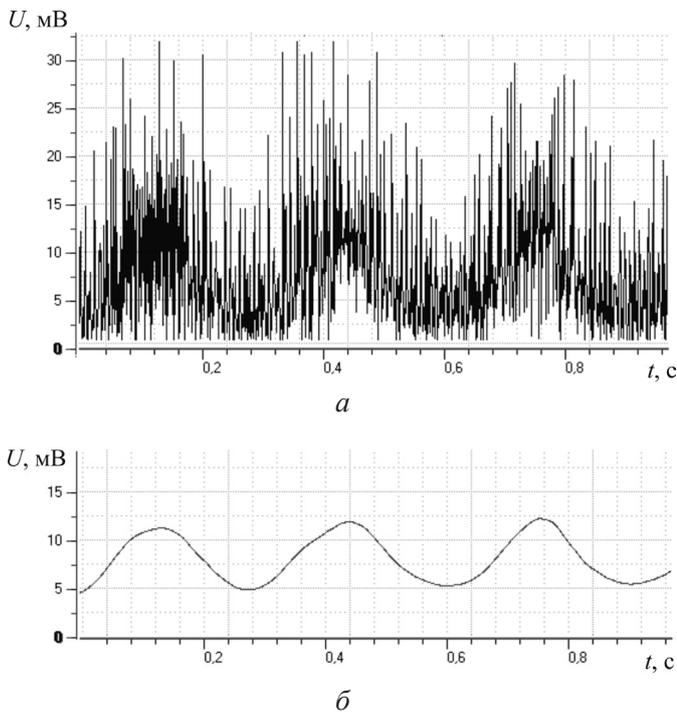


Рис. 5. Электрическое напряжение на калибрующем шунте, регистрируемое в процессе циклической деформации свинцовой полосы:

a – необработанный входящий сигнал; *б* – обработанный сигнал

известного КПД двигателя привода ($\eta = 0,886$) позволяют рассчитать среднее значение полной затрачиваемой механической мощности:

$$P_{\text{ср}}^{\text{мех}} = \eta P_{\text{ср}}^{\text{эл}} = \eta EI_{\text{ср}}^{\text{я}} = \\ = \eta EI_{\text{ср}}^{\text{ш}} = \eta EU_{\text{ср}}^{\text{ш}} / R^{\text{ш}},$$

где $P^{\text{мех}}$, $P^{\text{эл}}$ – соответственно механическая и электрическая мощность; $E = 198 \text{ В}$ – зарегистрированная ЭДС двигателя; $I^{\text{я}} = I^{\text{ш}}$ – ток якоря (шунта); $R^{\text{ш}} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ – сопротивление калибрующего шунта; среднее значение напряжения на калибрующем шунте в эксперименте зарегистрировано на уровне $U_{\text{ср}}^{\text{ш}} = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ В}$.

Указанная мощность содержит затраты на пластическое деформирование заготовки, величина которых служит важным источником информации о процессе пластического формоизменения образца в условиях сложного нагружения, а также различные динамические и тепловые потери. Для выделения составляющей полной механической мощности, расходуемой непосредственно на необратимое циклическое

деформирование металлоизделия, принято следующее предположение: мощность диссипации энергии за счет трения в узлах установки не зависит от величины активной нагрузки (давления на поверхности контакта боковых стенок и подающих плит с заготовкой). В этом случае экспериментально зафиксировать мощность деформирования можно на основе простого опыта – замера напряжения на шунте при работе установки без деформирования образца (при тех же частотах вращения вала). Анализ электрического сигнала показывает, что в этом случае напряжение на калибрующем шунте слабо меняется в ходе процесса, средняя величина зарегистрирована на уровне $U_{\text{ср}}^{\text{ш}} = 2,0 \text{ мВ}$.

Таким образом, средняя мощность пластического деформирования $P_{\text{ср}}^{\text{д}}$ может быть найдена в следующем виде:

$$P_{\text{ср}}^{\text{д}} = \eta E (U_{\text{ср}}^{\text{ш}} - U_{0\text{ср}}^{\text{ш}}) / R^{\text{ш}},$$

$$P_{\text{ср}}^{\text{д}} = \frac{0,886 \cdot 198(8,7 - 2,0)10^{-3}}{(0,75 \cdot 10^{-3})} = 1567 \text{ Вт.}$$

Полученные значения средней мощности деформирования и интенсивности необратимых деформаций использованы для верификации расчетного конечно-элементного комплекса LS-DYNA при решении задачи стесненного силового сдвига. Ключевыми особенностями модели процесса в LS-DYNA являются:

- использование трехмерного конечного элемента (тип Solid164) в ALE-формулировке, рекомендованной разработчиками пакета для процессов с существенным изменением формы тел; необходимость рассмотрения трехмерной модели обусловлена наличием сил трения на всех контактных поверхностях;

- выбор в качестве физических соотношений для материала заготовки модели изотропно упрочняющегося тела (на основе экспериментальных данных по одноосному сжатию использован степенной закон упрочнения);

- задание контакта на границах тел законом сухого трения Кулона-Амонтона с переходом в трение Прандтля при достижении предельного значения касательных напряжений;

- задание нагрузки посредством кинематических граничных условий, определенных на базе 3D-моделирования установки в программе T-Flex CAD.

Полученные расчетные результаты хорошо согласуются с величинами, экспериментально определенными по разработанным методикам. Средняя мощность пластического формоизменения, полученная в LS-DYNA, составляет около 1450 Вт, что всего на 7,5 % отличается от зарегистрированного в эксперименте значения. Расчетная величина интенсивности деформации в поверхностном слое образца (соответствующем месту нанесения сетки в эксперименте) циклично меняется по длине деформированной заготовки в пределах от 0,95 до 1,1. Сравнение этих показателей с экспериментальными данными, приведенными в таблице, также показывает приемлемое количественное соответствие.

Выводы

1. Разработана методика определения энергосиловых параметров процесса и компонентов деформации во внутренних слоях металлической полосы, подвергаемой интенсивному циклическому формоизменению, сопряженному с большими пластическими деформациями.

2. Определен характер необратимого деформирования полосы в рассматриваемых процессах. В частности, установлено, что схему деформирования образца в калибрующей части можно представить как результат совместного удлинения в направлении оси x_1 (со сжатием по оси x_3) и сдвигов в плоскостях, параллельных П1 и П2 (см. рис. 1). При этом влияние сдвиговых деформаций оказывается существенным в обеих плоскостях, что свидетельствует о существенной погрешности предлагавшихся ранее для данного процесса расчетных моделей, основанных на гипотезе плоской деформации.

3. Проведена верификация модели, построенной в программном комплексе LS-DYNA, на полученных экспериментальных данных. Установлен приемлемый уровень соответствия расчетных и экспериментальных значений характеристик.

Список литературы

1. Сидельников С.Б. Классификация и области применения совмещенных и комбинированных процессов обработки цветных металлов и сплавов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2005. – № 3. – С. 45–49.

2. Совершенствование конструкций установок совмещенной обработки алюминия и его сплавов / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, С.В. Солдатов, И.Н. Довженко, Р.И. Галиев, А.С. Сидельников, А.Л. Киселев, В.М. Беспалов, А.П. Самчук // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2013. – № 2. – С. 7–12.

3. Gorokhov Yu.V., Zagirov N.N., Gubanov I.Yu. Calculation of deformation-zone parameters during continuous extrusion by the conform method // Russian Metallurgy (Metally). – 2004. – N 4. – P. 396–399.

4. Langerweger J.F., Maddock B. Recent development in CONFORM and CASTEX continuous extrusion technology // Proceedings of Fourth International Aluminum Extrusion Technology Seminar, April 11–14, 1988. – Chicago, Illinois, 1988. – Vol. 2. – P. 533–538.

5. Одинокоев В.И., Черномас В.В., Ловизин Н.С. Двухручьевого литейно-ковочный модуль горизонтального типа для производства непрерывнолитых деформированных заготовок из цветных сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2008. – № 1. – С. 12–14.

6. Technology for preparing metal objects in a horizontal casting and metal deformation unit / V.I. Odinokov, V.V. Chernomas, N.S. Lovizin, V.V. Stulov, S.Yu. Sklyar // Metallurgist. – 2009. – Vol. 53, iss. 7–8. – P. 412–415. – doi: 10.1007/s11015-009-9198-0.

7. Producing continuous-cast deformed steel billet / V.V. Stulov, V.I. Odinokov, G.V. Ogloblin, V.V. Chernomas, A.A. Derbetkin // Steel in Translation. – 2009. – Vol. 39, iss. 8. – P. 639–644. – doi: 10.3103/S0967091209080075.

8. Chernomas V.V., Lovizin N.S., Sosnin A.A. Stability criteria for manufacturing metal products on a horizontal metal casting and deformation plant // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2012. – Vol. 41, iss. 2. – P. 158–162. – doi: 10.3103/S1052618812020045.

9. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В. Большие необратимые деформации и упругое последствие. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 311 с. – ISBN 978-5-8044-1423-9.

10. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с. – (Основы проектирования машин).

11. Островский Ю.И., Шетинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформации. – М.: Наука, 1988. – 248 с.

12. Фридман Я.Б., Зилова Т.К., Демина Н.И. Изучение пластической деформации и разрушения методом накатанных сеток. – М.: Оборонгиз, 1962. – 188 с.

13. ГОСТ 1292–81. Сплавы свинцово-сурьмянистые. Технические условия. – Изд. (март 2000 г.) с Изм. 1, 2, 3, 4 (ИУС. 1986. № 8; 1989. № 6; 1991. № 4;

1999. № 4). – Взамен ГОСТ 1292–74; введ. 1982–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 10 с.

14. Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. – Л.: Машиностроение, 1972. – 360 с. – ISBN 200000915733.

15. Шестаков Н.А., Власов А.В. Расчеты процессов обработки металлов давлением в MathCAD. Решение задач энергетическим методом: учебное пособие. – М.: Изд-во МГИУ, 2008. – 344 с. – ISBN 5-276-00076-X.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1(66), January – March 2015, Pages 33–41

Experimental determination of energy-power parameters and components of deformation during cyclic forming of material

Chernomas V.V.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: userman10@mail.ru

Sevastyanov G.M.², Ph.D. (Physics and Mathematics), e-mail: akela.86@mail.ru

Sevastyanov A.M.³, Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer, e-mail: mamia20@mail.ru

Bondarenko S.V.², Ph.D. student, e-mail: kriza_13@mail.ru

¹Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 27 Lenin Avenue, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation

²Institute of Machinery and Metallurgy, Russian Academy of Sciences (Far Eastern Branch), 1 Metallurgov st., Komsomolsk-on-Amur, 681005, Russian Federation

³Amur State University of Humanities and Pedagogy, 17/2 Kirova st., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovskiy kray, 681000, Russian Federation

Abstract

Production of special types of rolled nonferrous alloys using the combined technology of casting and deformation is a relatively new trend in resource-saving metallurgy. In domestic practice such techniques are implemented in the device for continuous casting and metal deformation. The key features of this device are cyclicity of process and the presence of large irreversible deformations of the workpiece (a strip of rectangular cross section in movable crystallizer, closed on four sides). These features lead to the problem of experimental data obtaining on the energy-power parameters of deformation, as well as the distribution and intensity of the strain state of the workpiece. In this paper, we propose a method for determining the instantaneous power of irreversible form changing by means of indirect measurements. The technique based on the detection and analysis of changes in the electrical characteristics of the motor drive in two modes of operation of the plant: cyclic deformation of the specimen and the motion of plant components without specimen deformation. We propose a method for directly measuring the components of the plastic deformation of the workpiece based on the method of knurled dividing grid with subsequent calculations by the Zibel's method. The experimental results indicate the expressed triaxial strain state of the workpiece because of the combined action of elongation and shifts in two mutually perpendicular planes. Verification of software package LS-DYNA carried out based on obtained experimental data by solving the problem of constrained shear, which coupled with the large plastic deformations.

Keywords:

cyclic forming, components of plastic deformation, strain intensity, power of irreversible form changing, deformation tool.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-33-41

References

1. Sidelnikov S.B. Klassifikatsiya i oblasti primeneniya sovmeshchennykh i kombinirovannykh protsessov obrabotki tsvetnykh metallov i splavov [Classification and fields of application of integrated and combined methods to process non-ferrous metals and alloys]. *Izvestiya vusshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya – Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2005, no. 3, pp. 45–49. (In Russian)

2. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Soldatov S.V., Dovzhenko I.N., Galiev R.I., Sidel'nikov A.S., Kiselev A.L., Bespalov V.M., Samchuk A.P. Sovershenstvovanie konstruksii ustanovok sovmeshchennoi obrabotki alyuminiya i ego splavov [Improving plant designs combined treatment of aluminum and its alloys]. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov – Mechanical machinery of metallurgical enterprises*, 2013, no. 2, pp. 7–12.
3. Gorokhov Yu.V., Zagirov N.N., Gubanov I.Yu. Calculation of deformation-zone parameters during continuous extrusion by the conform method. *Russian metallurgy (Metally)*, 2004, no. 4, pp. 396–399.
4. Langerweger J.F., Maddock B. Recent development in CONFORM and CASTEX continuous extrusion technology. Proceedings of Fourth International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Chicago, Illinois, April 11–14, 1988, vol. 2, pp. 533–538.
5. Odinokov V.I., Chernomas V.V., Lovizin N.S. Dvukhruch'evoi liteino-kovochnyi modul' gorizontalnogo tipa dlya proizvodstva nepreryvnolitykh deformirovannykh zagotovok iz tsvetnykh splavov [Two-strand casting-forging module horizontal type for the production of continuously deformed pieces of non-ferrous alloys]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2008, no. 1, pp. 12–14.
6. Odinokov V.I., Chernomas V.V., Lovizin N.S., Stulov V.V., Sklyar S.Yu. Technology for preparing metal objects in a horizontal casting and metal deformation unit. *Metallurgist*, 2009, vol. 53, iss. 7–8, pp. 412–415. doi: 10.1007/s11015-009-9198-0
7. Stulov V.V., Odinokov V.I., Ogloblin G.V., Chernomas V.V., Derbetkin A.A. Producing continuous-cast deformed steel billet. *Steel in Translation*, 2009, vol. 39, iss. 8, pp. 639–644. doi: 10.3103/S0967091209080075
8. Chernomas V.V., Lovizin N.S., Sosnin A.A. Stability criteria for manufacturing metal products on a horizontal metal casting and deformation plant. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2012, vol. 41, iss. 2, pp. 158–162. doi: 10.3103/S1052618812020045
9. Burenin A.A., Kovtanyuk L.V. *Bol'shie neobratimye deformatsii i uprugoe posledeistvie* [Large irreversible deformation and elastic aftereffect]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2013. 311 p. ISBN 978-5-8044-1423-9
10. Prigorovskii N.I. *Metody i sredstva opredeleniya polei deformatsii i napryazhenii: Spravochnik* [Methods and means of determining the strain and stress fields. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 248 p.
11. Ostrovskii Yu.I., Shepinov V.P., Yakovlev V.V. *Golograficheskie interferentsionnye metody izmereniya deformatsii* [Holographic interference method for measuring deformation]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 248 p.
12. Fridman Ya.B., Zilova T.K., Demina N.I. *Izuchenie plasticheskoi deformatsii i razrusheniya metodom nakatannykh setok* [The study of plastic deformation and fracture by formed grids method]. Moscow, Oborongiz Publ., 1962. 188 p.
13. *GOST 1292–81. Splavy svintsovo-sur'myanistyje. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 1292–81. Lead-antimony alloys. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2000. 10 p.
14. Smirnov-Alyayev G.A., Chikidovskii V.P. *Eksperimental'nye issledovaniya v obrabotke metallov davleniem* [Experimental studies in metal forming]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 360 p.
15. Shestakov N.A., Vlasov A.V. *Raschety protsessov obrabotki metallov davleniem v MathCAD. Reshenie zadach energeticheskim metodom* [Calculations of metal forming processes in MathCAD. Problem solving by energy method]. Moscow, MGIU Publ., 2008. 344 p. ISBN 5-276-00076-X

Received 19 January 2015

Revised 10 February 2015

Accepted 15 February 2015