

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЕНЕТРИРОВАНИЯ^{*)}

Л.Н. Крамарев, Д.В. Жегалов

Нижний Новгород

Проведены испытания образцов из меди и сплава АМГ-6 на сжатие с инденторами в виде шара диаметрами 5 и 10 мм. Предложен метод испытания для определения точности построения диаграммы деформирования при растяжении по результатам испытаний на сжатие через индентор. Рассмотрено устройство замера перемещения индентора относительно поверхности плоского образца. Приведено описание метода испытания двойных образцов на сжатие через индентор. Исследован процесс упрочнения поверхности цилиндрической оболочки методом дорнования (продавливание шара через отверстие), приведены результаты численного и натурального экспериментов.

Введение

Задачи экспериментального оснащения математических моделей складываются из базовых испытаний, экспериментов сравнения и испытаний, позволяющих определять границы применимости используемых моделей. Новые методические разработки в области изучения свойств материалов позволяют снижать трудоемкость при проведении испытаний и повышать их информативность. К таким испытаниям относятся эксперименты на растяжение и пенетрирование, выполняемые на одном образце, испытания на сжатие через индентор двойных образцов, эксперименты внедрения индентора в форме шара в отверстие с натягом. Эксперименты на растяжение и пенетрирование, выполняемые на одном образце, подтверждают возможность получения достоверных результатов по свойствам материалов экспериментально-теоретическим методом, а последующие эксперименты дают оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне внедрения индентора в исследуемый материал и возможность сравнения с данными численного решения. Экспериментальным и численным методами решена задача об определении влияния граничных условий на зависимость "нагрузка – глубина внедрения индентора" при проведении испытаний методом пенетрирования. Проведены испытания для меди и сплава АМГ-6 на сжатие с инденторами в виде шара диаметрами 5 и 10 мм. Исследован процесс упрочнения поверхности цилиндрической оболочки методом дорнования (продавливание шара), приведены результаты численного и натурального экспериментов. Все испытания выполнялись на модернизированных испытательных машинах типа УМЭ-10Т и ЦДТЕ-30. Результаты экспериментов

^{*)} Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 08-01-00500-а, 07-08-13637-офи_ц) и Министерства образования и науки РФ (грант Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-3367.2008.8).

регистрировались с помощью датчиков по силе и перемещению, сохранялись и обрабатывались на ЭВМ.

1. Численное моделирование

Численное моделирование задач осуществлялось в осесимметричной постановке. Для описания деформирования тел вращения в рамках гипотез механики сплошной среды использовался вариационно-разностный подход. Изложенный вариант вариационно-разностного метода для двумерных задач реализован С.В. Зефировым в пакете прикладных программ (ППП) "Динамика-2" [1].

В качестве уравнений состояния для описания упругопластических свойств материалов применялась теория течения с нелинейным изотропным и кинематическим упрочнением. Для процессов активного нагружения, близких к пропорциональным, достаточно учитывать лишь нелинейное изотропное упрочнение. В этом случае необходимо задать истинную диаграмму деформирования материала, определяемую экспериментально.

2. Определение оптимальных размеров образцов

С целью определения оптимального размера образцов для испытаний на пенетрирование на программном комплексе "Динамика-2" были проведены численные эксперименты. По результатам решения контактной задачи индентирования стального шара (диаметр 5 и 10 мм) в медную пластину (толщина 5 и 7,5 мм) оценивалось расстояние от точки индентирования до края образца, при котором граничные условия не влияют на диаграмму процесса индентирования. Расчет выполнялся с одинаковыми исходными физико-механическими характеристиками материала, менялась только геометрия образцов (расстояние от точки индентирования до края образца). Результат численных экспериментов индентирования стального шара диаметром 10 мм в медную пластину толщиной 5 мм представлен на рис. 1. Результаты исследования свидетельствуют о близости диаграмм, полученных при условии, что расстояние от точки индентирования до края образца составляет величину до 2,5 диаметра индентора.

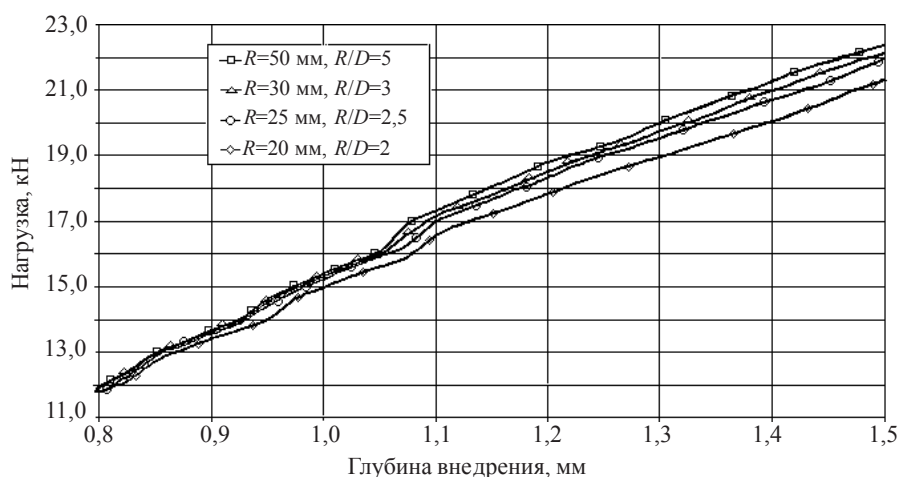


Рис. 1

По результатам расчетов установлено, что минимальное расстояние от точки индентирования до края образца в зависимости от диаметра индентора и толщины

образца составляет:

- при толщине образца 5 мм и диаметре индентора 10 мм – 2,5 диаметра индентора;
- при толщине образца 5 мм и диаметре индентора 5 мм – 4,0 диаметра индентора;
- при толщине пластины 7,5 мм и диаметре индентора 5 мм – 4,0 диаметра индентора.

Полученные результаты совпадают с нормативными требованиями ГОСТ 9012-59 "Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю", в котором регламентировано минимальное расстояние от точки индентирования до края образца 2,5 диаметра отпечатка.

3. Эксперимент на растяжение и пенетрирование на одном образце

Для определения точности построения диаграммы деформирования при растяжении по результатам испытаний на сжатие было проведено испытание на растяжение на круглом сплошном образце с замером деформации на рабочей части и получением диаграммы в цифровом виде (рис. 2). Затем из головок образца были изготовлены диски для испытаний на пенетрирование. Измерялась величина нагрузки, действующей на индентор, и глубина внедрения его в исследуемый материал. Результаты численного эксперимента, выполненного с использованием программы "Динамика-2" [1], сравнивались с данными натурального эксперимента.

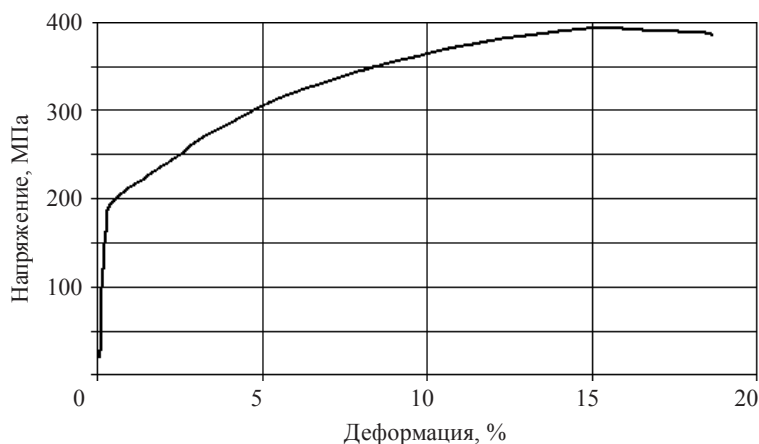


Рис. 2

Результаты численного и натурального экспериментов приведены на рис. 3. Материал образца – АМГ-6, диаметр рабочей части образца – 12 мм, диаметр диска – 45 мм, толщина диска – 13,2 мм, диаметр индентора – 5 мм. В расчетах использована истинная диаграмма, полученная по данным испытания на растяжение. Испытания проводились на модернизированной испытательной машине УМЭ-10Т. В зависимости от вида испытательной техники автоматизация механических испытаний осуществляется с помощью аппаратуры на базе ПЭВМ IBM 286 с платой L-264 и усилителями ПА-1 в комплекте со штатным силоизмерителем машины УМЭ-10Т с тиристорным приводом и модернизированным охлаждаемым деформометром с тензообразователем.

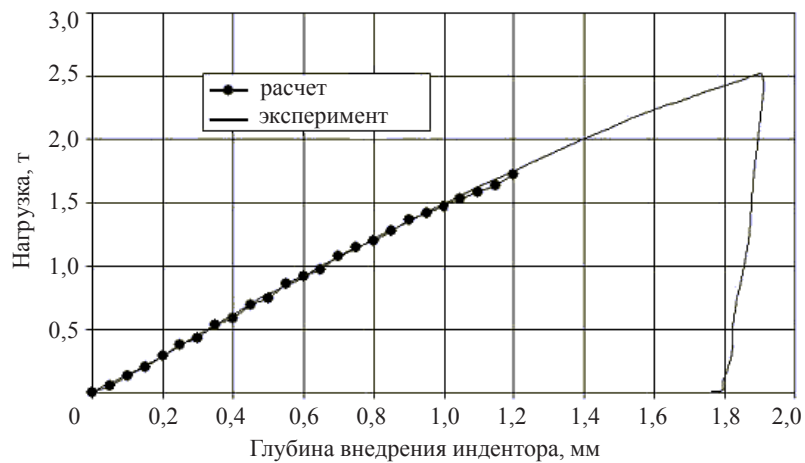


Рис. 3

Испытательная машина УМЭ-10ТМ включена в автоматизированный комплекс, позволяющий: в цифровом виде регистрировать информацию по измерению нагрузки и перемещений на рабочей части образца в процессе эксперимента; управлять по заранее заданной программе выбранным контролируемым параметром процесса нагружения (нагрузка, деформация). Визуально диаграмма каждого эксперимента представляется в графическом виде в координатах $P-\Delta L$ ($\sigma-\epsilon_{11}$) и в табличном виде на IBM PC.

Таким образом, при отсутствии ошибок в программном обеспечении и адекватных свойствах конструкционного материала, получаемых из испытаний по методике "двойного" эксперимента, обеспечивается требуемая точность результатов в исследовании процессов упругопластического деформирования при больших деформациях.

На рис. 4 показаны образцы до испытания на сжатие (диски) и образец на растяжение, из которого после испытания изготавливаются такие диски. Один диск уже испытан.

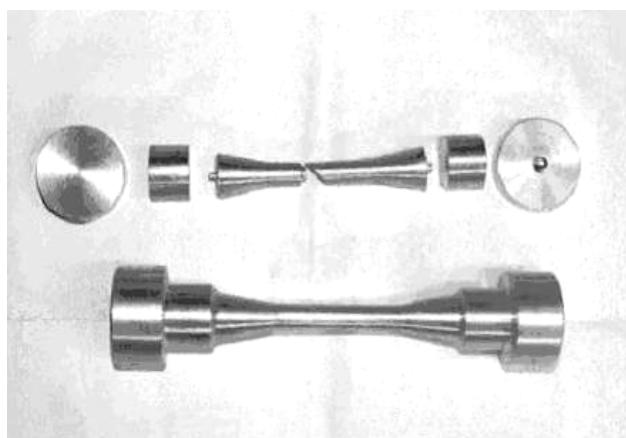


Рис. 4

4. Измеритель глубины индентирования

При внедрении индентора важно знать фактическую глубину погружения относительно поверхности образца. Для этого был разработан и изготовлен измеритель глубины индентирования следующей конструкции. Индентор в форме шара помещался между образцом и дном стакана с отверстием. С помощью пуансона индентор вдавливался в образец. На стакан надевался цилиндр, торец которого касался поверхности образца. Деформометр с тензометрическими преобразователями закреплялся на поверхности стакана и цилиндра. Относительное смещение цилиндра и стакана фиксировалось деформометром. На рис. 5 показана схема (а) и общий вид (б) измерителя глубины индентирования.

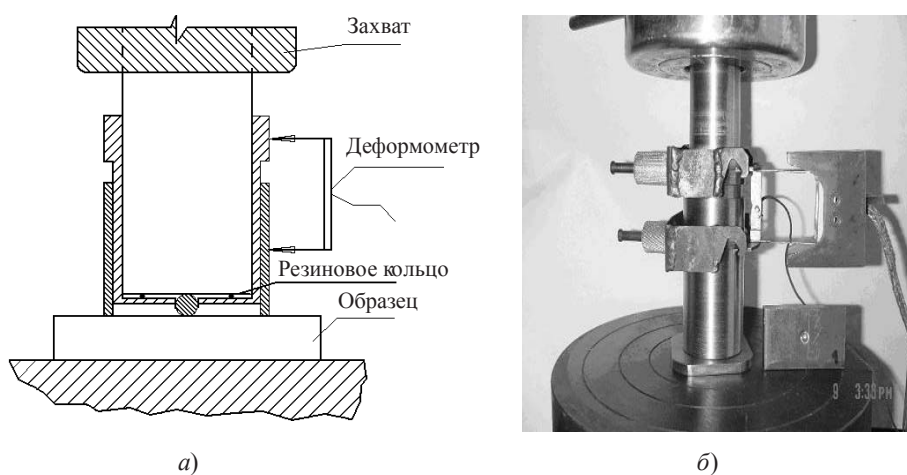


Рис. 5

На программном комплексе "Динамика-2" были проведены расчеты контактной задачи индентирования стального шара диаметром 5 мм в медную пластину толщиной 5 мм. В процессе расчета в исходные данные задачи вводилась в табличном виде "истинная" диаграмма деформирования материала до деформации в 100%, полученная из литературы и достроенная до 100% касательной к участку диаграммы перед пределом прочности. Результаты расчета представлялись в виде диаграммы индентирования в осях "глубина внедрения – вдавливающая сила", которая сравнивалась с экспериментальной диаграммой, полученной при индентировании стального шара диаметром 5 мм в медную пластину толщиной 5 мм на испытательной машине УРС 20/6000. Глубина внедрения в процессе испытания регистрировалась тензометрическим преобразователем (деформометром), вдавливающая сила регистрировалась динамометром испытательной машины. С учетом относительной разницы значений осевых усилий, полученных из эксперимента и численного решения при одинаковых смещениях, осуществлялась процедура корректировки диаграммы деформирования. Далее задача рассчитывалась с измененной диаграммой деформирования, и осевые усилия сравнивались с экспериментальными значениями. Процедура корректировки диаграммы деформирования итерационная, она проводилась до совпадения экспериментальных и расчетных результатов с заданной точностью. В результате была найдена кривая диаграммы деформирования, которая соответствовала данному материалу [2].

Подобным образом построены диаграммы деформирования материалов АК-4, Д-16 и 12Х18Н10Т. Расчетные диаграммы индентирования хорошо совпадают с экспериментальными, а построенные диаграммы деформирования – с диаграммами, полученными экспериментально (при испытаниях на одноосное растяжение) и имеющимися в литературе.

5. Построение термомеханической поверхности текучести

Базовый эксперимент "термопластичность" для модели термовязкопластичности с комбинированным упрочнением выполняется по программе специального циклического нагружения [3]. Монотонное нагружение чередуется с промежуточными циклами, ширина петли составляет 0,1%. Значение напряжения в цикле в области сжатия в точке реверса равно пределу текучести с допуском на остаточную деформацию 0,1%. В результате испытаний получены диаграмма деформирования и геометрическое место точек, соответствующих пределам текучести с обратным знаком по отношению к направлению первоначального деформирования. Термомеханическая поверхность строится по данным базовых экспериментов, выполненных при выбранных базовых температурах. Методом последовательных приближений уточняется положение отдельных участков термомеханической поверхности путем проведения промежуточных испытаний.

С целью снижения трудоемкости испытаний при построении термомеханической поверхности дополнительные эксперименты могут проводиться менее затратным методом. Испытание на сжатие через индентор с регистрацией действующей нагрузки и глубины внедрения индентора позволяет в сочетании с численными методами получить диаграмму растяжения для данного материала [2]. Необходимость уточнения значений механических свойств определяется резким изменением предела текучести в зависимости от температуры (20–350°C). Параметры скорости нагружения в атермической зоне мало изменяются. Коррекция же скорости нагружения практически не требуется. Скорость перемещения активного захвата в промежуточных опытах с применением метода пенетрирования соответствует скорости перемещения в экспериментах по программе базового эксперимента "термопластичность".

В качестве образцов при получении диаграмм деформирования методом пенетрирования могут быть использованы головки от образцов, прошедших испытания на растяжение. Для получения достоверных данных при повышенных температурах, когда эффекты ползучести существенны, требуется экспериментальным путем определить скорости деформирования, соответствующие атермической зоне поведения исследуемого материала. Для стали 12Х18Н10Т получены данные по построению диаграммы растяжения экспериментально-теоретическим методом.

6. Испытание двойных образцов на сжатие через индентор

С целью исследования распределений напряжений в поперечном сечении образца при внедрении индентора применялся двойной образец, сжимаемый в специальном устройстве (рис. 6) [4]. Плоскости соприкосновения образцов друг с другом и с опорной поверхностью шлифовались. После испытания проводился замер зон пластичности в месте контакта по матовому оттенку на шлифованной поверхности, характерному для остаточной деформации. Результаты испытаний сравнивались с данными численного эксперимента по расположению границы пластической зоны. Получен результат численного расчета с указанием зон различной интенсивности

и способа разбивки сетки конечных элементов. Выполнены исследования по определению изменения структуры металла в месте внедрения индентора на границе двух сжатых образцов. Определены границы зоны пластичности.

Двойной образец после проведенного испытания показан на рис. 7. Данные по численному эксперименту (интенсивность деформаций) приведены на рис. 8. Индентор в численном эксперименте двигается снизу вверх.



Рис. 6

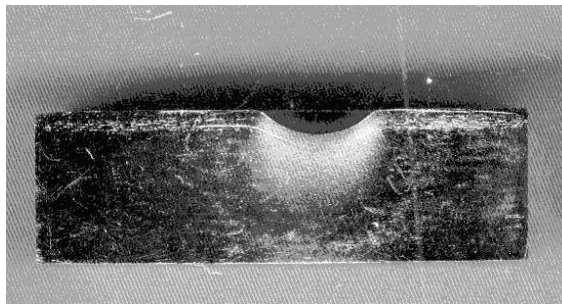


Рис. 7

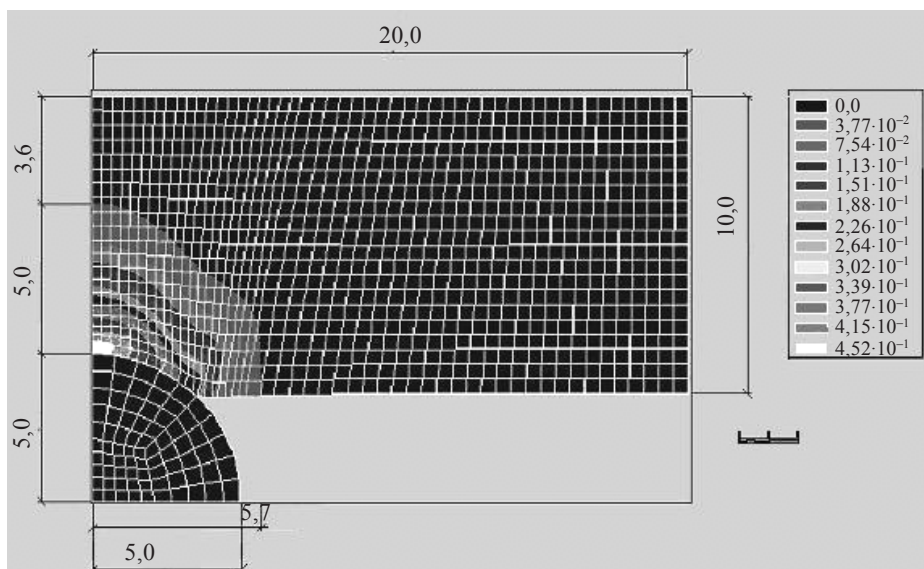


Рис. 8

Сравнение распределения интенсивности деформаций, полученных в результате численного моделирования, и зон пластичности в месте контакта двух частей двойного образца позволяет судить о достоверности полученных результатов в численном эксперименте.

7. Процесс дорнования отверстия

Процесс обработки внутренней поверхности отверстия продавливанием шара применяется с целью калибрования, упрочнения и уменьшения шероховатости внутренней поверхности отверстия. Дорнованием получают отверстия 1–2 класса точности с шероховатостью поверхностей стенок, соответствующей 9–10 классам чистоты.

Определение напряжений и деформаций, возникающих в обрабатываемом металле, а также точное определение глубины упрочнения, необходимых для выполнения заданных операций, возможно не всегда. Использование экспериментально-численного метода позволяет моделировать процесс обработки металла, получать картину распределения полей напряжений и деформаций в обрабатываемом отверстии, подбирать диаметр индентора и скорость обработки.

Экспериментально-численным методом исследовался процесс внедрения индентора в форме шара в отверстие с натягом. Использовался шар из стали ШХ15 диаметром 14,3 мм. Продавливание шара осуществлялось с помощью пуансона диаметром 11 мм. Диаметр отверстия в заготовке из стали 12Х18Н10Т составлял 14,0 мм. Таким образом, продавливание индентора в форме шара осуществлялось с некоторым натягом через предварительно выполненное отверстие.

Результаты численного расчета позволяют определить участки выброса материала в месте входа и выхода индентора из заготовки, а также размеры участка калибрования и равномерного упрочнения. Распределение интенсивностей деформаций в отверстии после процесса дорнования представлено на рис. 9. Индентор в численном эксперименте двигается снизу вверх.

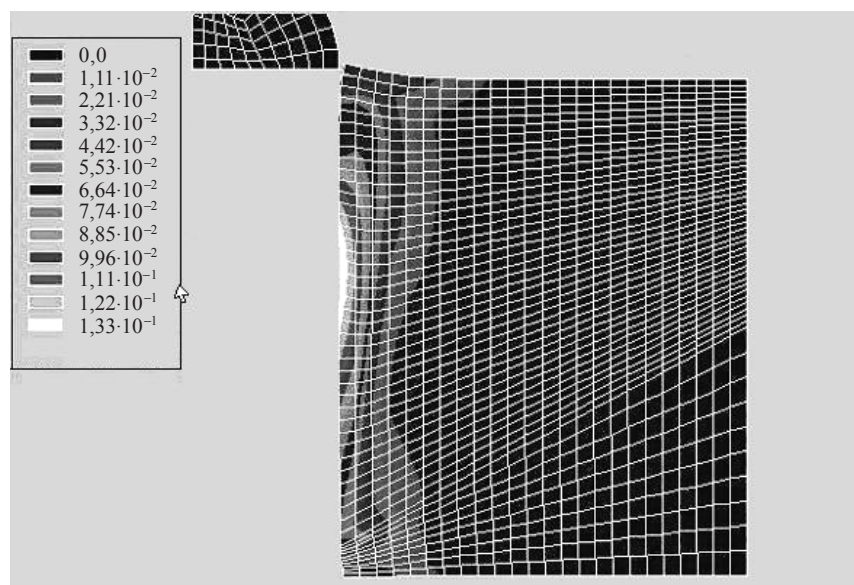


Рис. 9

8. Исследование закономерностей деформирования при пенетрировании и последующем кручении

Экспериментальное определение закономерности деформирования при внедрении индентора в форме шара в плоскую поверхность исследуемого материала при сжатии и последующем кручении выполнялось по программе Р-М-опыта. Ступенчатый режим нагружения начинался внедрением индентора на определенную глубину. При постоянно действующей нагрузке включалось нагружение крутящим моментом индентора относительно лунки. На следующем этапе порядок нагружения повторялся. Таким образом устанавливалась зависимость между постоянной сжимающей нагрузкой и крутящим моментом. Испытание по программе Р-М-опытов проводилось на машине ЦДТЕ-30 с гидроприводом по нагрузке и механическим приводом по крутящему моменту. Регистрация параметров нагружения (сила, удлинение, крутящий момент, угол закручивания) осуществлялась в автоматическом режиме с использованием соответствующих тензопреобразователей и комплекта тензометрической аппаратуры. Анализ результатов испытания по программе Р-М-опыта показал падение нагрузки после начала действия крутящего момента при достижении максимальной величины (рис. 10).

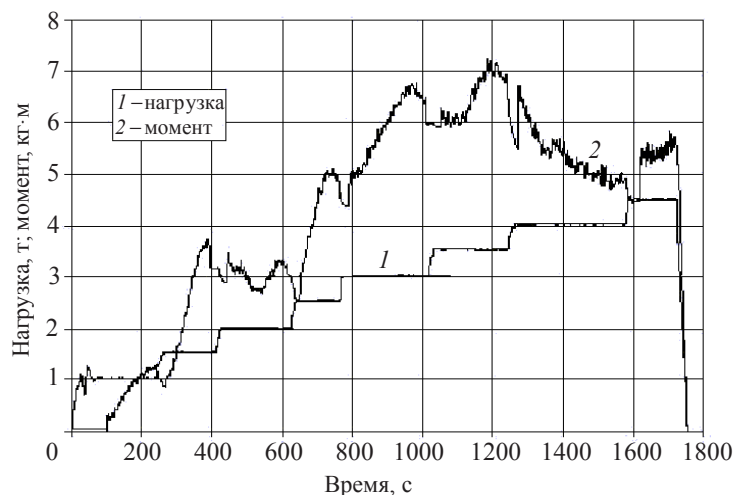


Рис. 10

Заключение

Использование предлагаемых видов испытаний расширяет возможности получения достоверной информации как из базовых экспериментов, так и из экспериментов сравнения для оснащения моделей, описывающих поведение материалов при неоднородном напряженном состоянии и больших деформациях, а также для определения оптимальных параметров технологических операций.

Ключевые слова: испытания образцов, медь, сплав АМГ-6, сферический индентор, дорнование, численные и натурные эксперименты, диаграмма деформирования при растяжении.

Литература

1. Пакет программ "Динамика-2" для решения плоских и осесимметричных нелинейных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами / В.Г. Баженов

[и др.] // Мат. моделирование. – 2000. – Т.12, №6. – С. 67–72.

2. Патент на изобретение № 2324162 "Способ определения деформационных и прочностных свойств материалов при больших деформациях и неоднородном напряженно-деформированном состоянии" / Баженов В.Г. (RU), Зефилов С.В. (RU), Крамарев Л.Н. (RU), Осетров С.Л. (RU), Павленкова Е.В. (RU). Заявка № 2006115805. Приоритет изобретения 06 мая 2006 г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 мая 2008 г.

3. А.с. 1597682 А1 СССР, G1 №3/32. Способ малоциклового испытания материала / Крамарев Л.Н., Филипов А.Р. (СССР). – №4433009/25-28; Заявлено 28.03.88; опубл. 07.10.90, Бюл. № 37. – 2 с., ил. 1.

4. *Безъязычный, В.Ф.* / В.Ф. Безъязычный, Б.М. Драпкин, М.А. Прокофьев, М.В. Тимофеев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – Т. 71, №4. – С. 32–35.

[03.09.2008]

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF ELASTO-PLASTIC PENETRATION PROCESSES

L.N. Kramarev, D.V. Zhegalov

Copper and the AMG-6 alloy are tested for compression using 5-mm and 10-mm spherical indenters. A testing method for determining the accuracy of constructing tensile deformation diagrams based on the results of compression tests through indenters is presented. A device for measuring the displacement of the indenter relative to the surface of a plane specimen is described. A method of compression tests of double specimens through indenters is presented. The process of hardening the surface of a cylindrical shell by mandrelling is examined; the results of a numerical and a full-scale experiments are given.

Key words: tests of specimens, copper, AMG-6 alloy, spherical indenter, mandrelling, numerical and full-scale experiments, tensile deformation diagram.