

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Опёноква Е.А., Петров П.А.

Московский политехнический университет, Москва

Ключевые слова: неразъемное соединение, холодная деформация, совместная пластическая деформация разных металлов, компьютерное моделирование, углеродистая сталь, ступица ведомого диска сцепления, напряженно-деформированное состояние.

Аннотация. В работе представлены результаты компьютерного анализа формообразования неразъемного соединения методом совместной пластической холодной деформации заготовок из углеродистой стали разных марок – сталь 20 и сталь 45. Исследован процесс формообразования с применением компьютерного моделирования. Моделирование проведено численно с применением программы, основанной на теории течения. В программе интегрирован метод конечных элементов. Определены параметры напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, а также распределение температуры в очаге деформации и изменение макроструктуры металла.

INVESTIGATION OF PLASTIC FLOW OF METAL DURING THE FORMATION OF A NON-DISPLACEMENT JOINT

Openkova E.A., Petrov P.A.

Moscow Polytechnic University, Moscow

Keywords: non-displacement joints, cold forging, joints by plastic deformation methods of different metals, computer modeling, carbon steel, clutch driven disk hub, stress-strain state.

Abstract. The paper presents the results of computer analysis of the formation of a permanent joint by the method of joint plastic cold deformation of blanks made of carbon steel of different grades - steel 20 and steel 45. The process of shaping was studied using computer modeling. The modeling was carried out numerically using a program based on the flow theory. The finite element method is integrated into the program. The parameters of the stress-strain state in the deformation zone, as well as the temperature distribution in the deformation zone and the change in the metal macrostructure were determined.

Неразъемные соединения, образованные методами пластического деформирования, получили широкое распространение в различных областях промышленности, в том числе в машиностроении. Подобный метод позволяет получить сборную заготовку для ступицы ведомого диска сцепления, метод описан в работе [1]. Технология изготовления сборной заготовки является альтернативой традиционным технологиям (горячая объемная штамповка; холодная объемная штамповка, штамповка обкатыванием и торцовая раскатка) и имеет более высокий КИМ, меньшую трудоемкость механической обработки заготовки, изготовленной пластическим деформированием, меньшую себестоимость и возможность выпуска продукции малыми сериями.

Сборная заготовка представляет собой неразъемное соединение двух компонентов. Первый компонент представляет собой фланец с внутренним профильным отверстием из листового проката (рис. 1, а), второй компонент –

бобышка – круглый прокат мерной длины (рис. 1, б). Материал фланца – углеродистая сталь 45, бобышки – углеродистая сталь 20.

Формирование неразъемного соединения осуществляется в штампе за счет осадки и высадки металла бобышки при комнатной температуре (рис. 1, в). При осадке бобышка располагается в центральном отверстии фланца, и в результате радиального течения материала бобышки происходит заполнение профильного отверстия фланца. Таким образом, формируется неразъемное соединение 2 разнопрофильных компонентов из различных деформируемых металлов, основанное на силовом и геометрическом замыкании, которое способно передавать крутящий момент. При этом является несущественным формируется или нет металлическая связь за счет диффузии на поверхности контакта двух компонентов. Информационно-аналитический обзор работ по теме о совместной пластической деформации разнородных стальных заготовок [2-5] показывает малое число работ, посвященных углубленному изучению данного вопроса.

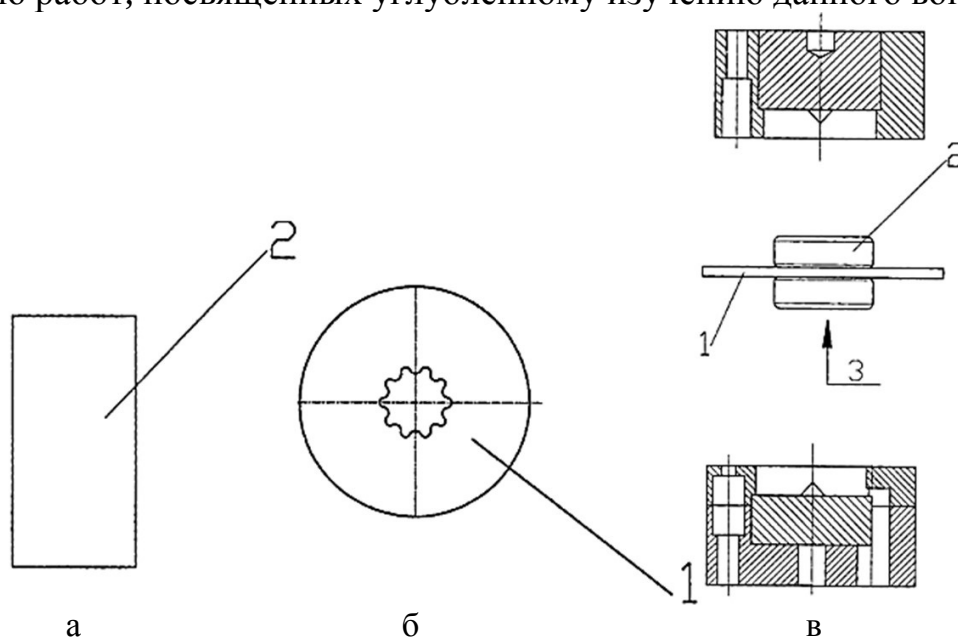


Рис. 1. Способ неразъемного соединения заготовок круглого и листового проката [1]:
а – охватываемая деталь; б – охватывающая деталь; в – соединение после осадки:
1 – бобышка; 2 – фланец; 3 – неразъемное соединение

Цель данной работы заключается в исследовании параметров напряженно-деформированного состояния при совместной пластической деформации заготовок из стали 20 и стали 45. В работе [6] приводится описание разработанной в программе QForm модели процесса формирования неразъемного соединения. Используем модель работы [6] для достижения цели, поставленной в данной работе. Программа QForm [7] основана на теории течения и позволяет с применением метода конечных элементов (МКЭ) выполнить расчет параметров напряженно-деформированного состояния в процессе деформирования металлов.

Условно процесс формирования соединения можно разделить на три этапа (рис. 2). Первый этап связан с деформированием бобышки за счет осадки верхним и нижним штампами (рис. 2, б). На первом этапе выступы профильного отверстия фланца и бобышка не имеют прямого контакта, между ними есть технологический зазор. При осадке происходит увеличение диаметра бобышки и

уменьшение зазора между компонентами (рис. 2, в). К концу первого этапа боковая поверхность бобышки касается внутренних выступов отверстия во фланце (см. рис. 2, в).

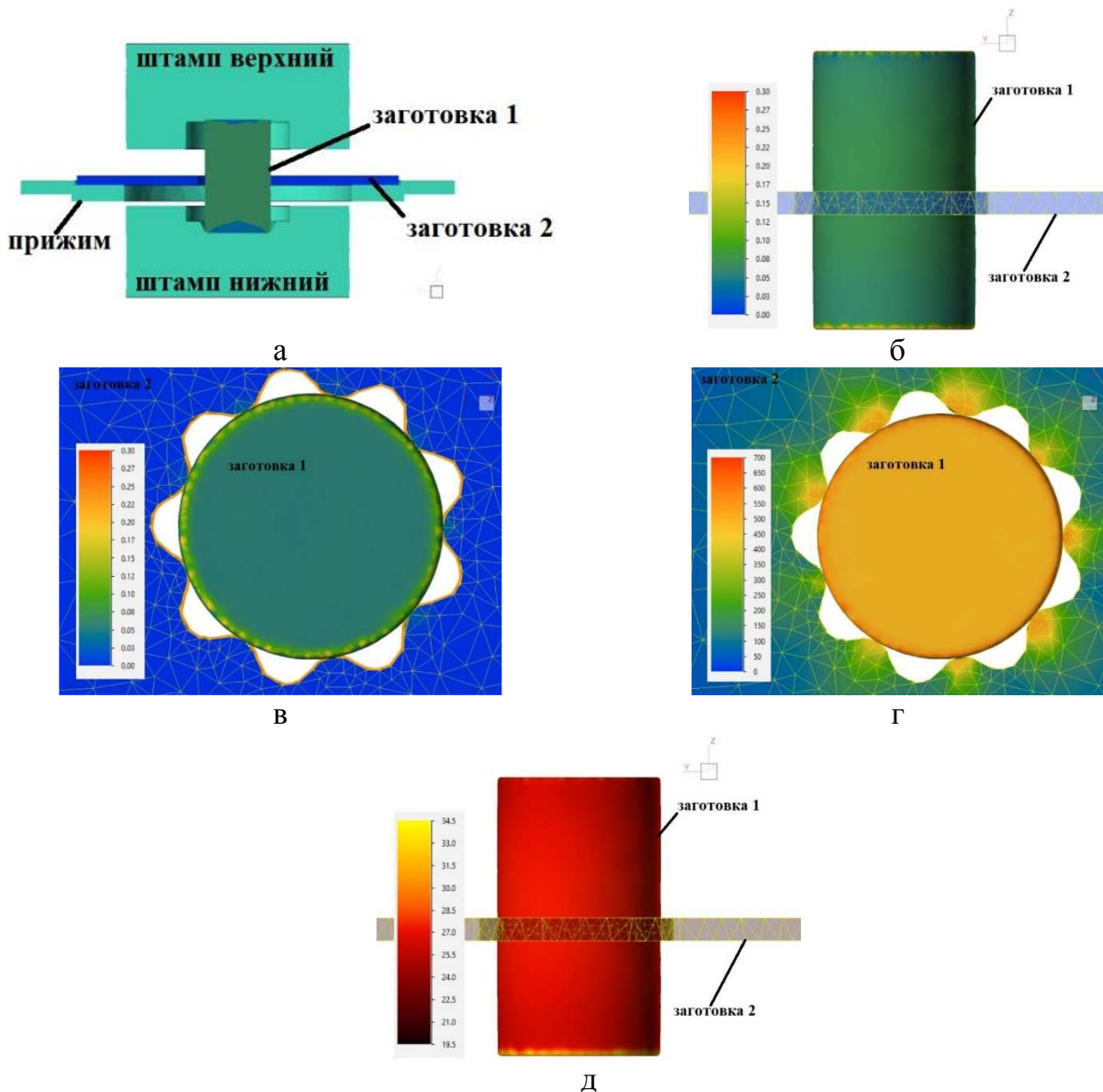


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние к концу первого периода формирования неразъемного соединения: а – исходное положение инструментов и заготовок; б – распределение интенсивности деформаций в заготовках; в – контакт между заготовками к концу первого этапа; г – распределение интенсивности деформаций в заготовках; д – распределение температуры в заготовках [°C]

На рисунке 2 показано распределение параметров напряженно-деформированного состояния: пластической (интенсивности) деформации, интенсивности напряжений, температуры по объему бобышки и фланца к концу первого периода. К этому времени пуансоны начинают формировать края бобышки, именно там значение пластической деформации выше (рис. 2, а). В процессе деформирования наблюдается увеличение температуры бобышки, особенно вблизи зон интенсивного сдвига и концентрации напряжений (рис. 2, г).

При дальнейшем деформировании начинается второй этап формирования неразъемного соединения – происходит непосредственный контакт материала бобышки с материалом фланца, заполнение фигурного профиля отверстия в фланце, осадка верхней части бобышки и осадка, совмещенная с высадкой нижней части бобышки. В начальный момент второго этапа площадь контакта небольшая, и как следствие, возникают достаточно большие напряжения в зоне контакта, приводящие к деформированию выступов (рис. 3, а). При дальнейшей осадке площадь контакта увеличивается, материал бобышки заполняет профильное отверстие фланца (рис. 3, б).

В конечный момент второго этапа происходит полное заполнение профильного отверстия фланца материалом бобышки и обеспечивается механическое зацепление между металлом бобышки и металлом фланца (рис. 3, б). Верхний и нижний штампы формируют объем бобышки над и под фланцем. Образуется двойная бочка обеспечивающее геометрическое замыкание.

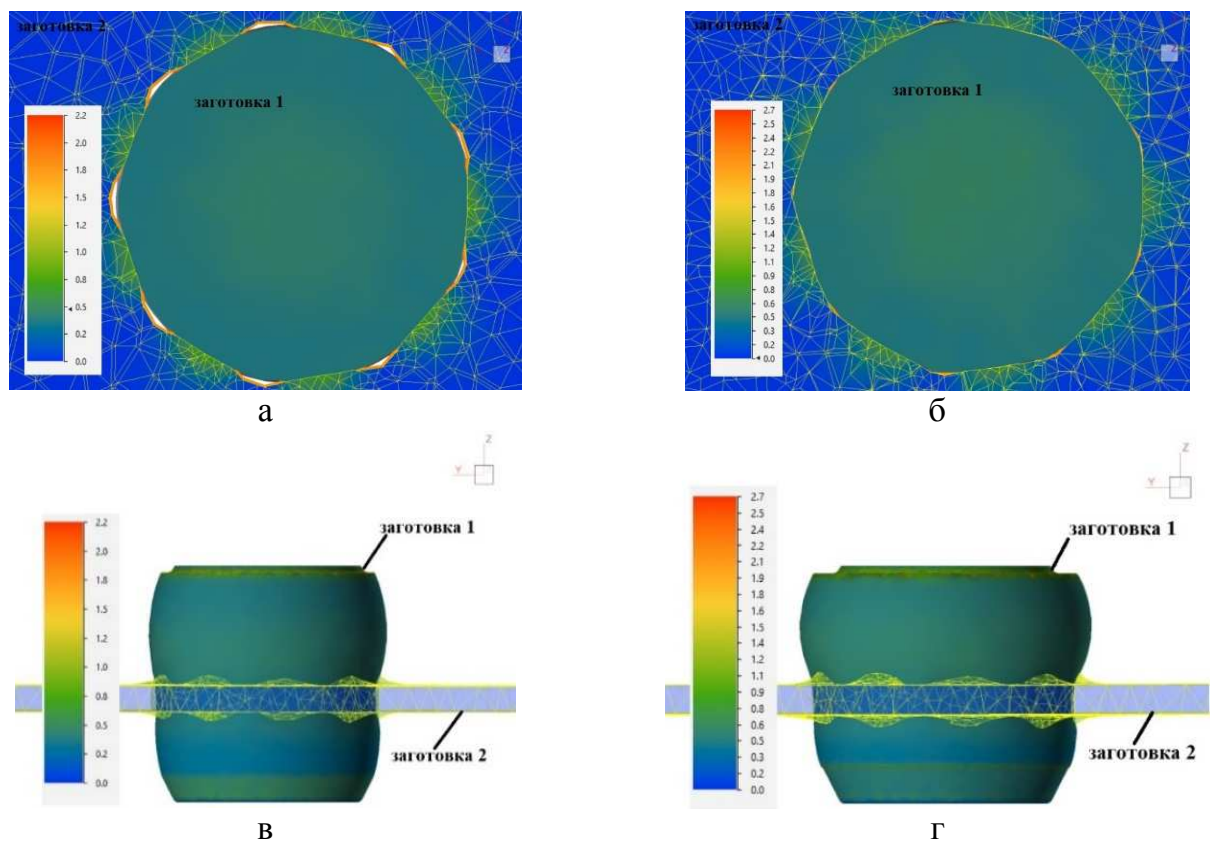


Рис. 3. Распределение интенсивности деформаций на втором этапе формирования неразъемного соединения: а, в – в начале второго этапа; б, г – в конце второго этапа

На третьем этапе формирования неразъемного соединения дальнейшая деформация бобышки приводит к растягиванию профильного отверстия фланца в радиальном направлении, более четкому формированию объемов над и под фланцем (рис. 4). Соединение приобретает окончательную форму и готово к дальнейшей механической обработке.

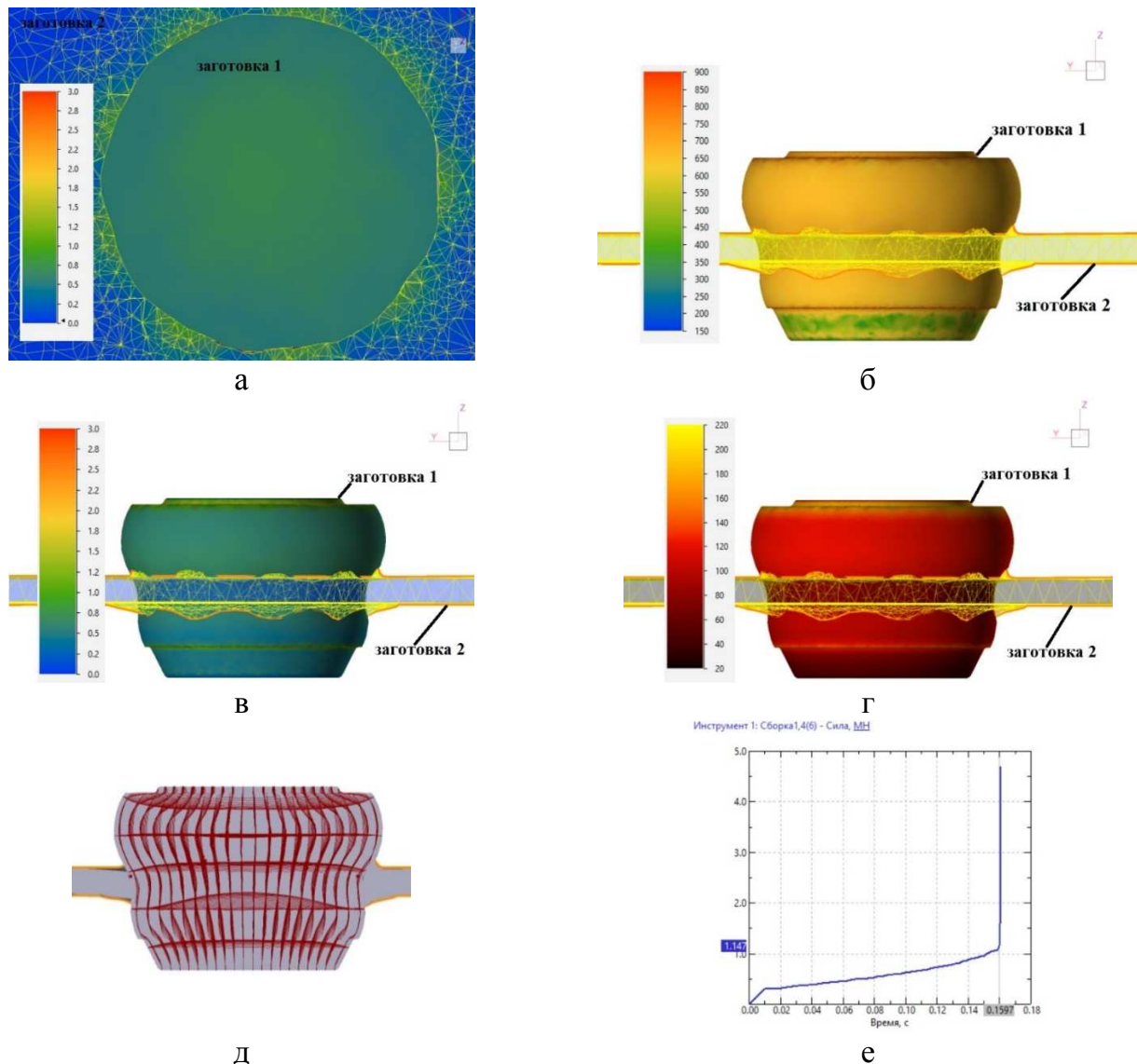


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние к концу третьего этапа формирования неразъемного соединения: а, в – пластическая (интенсивность) деформация; б – интенсивность напряжений [МПа]; г – температура [°C]; д – искажение волокон; е – график силы деформирования

Выводы

По результатам исследования течения металла в процессе формирования неразъемного соединения двух металлических заготовок можно сделать следующие выводы.

Важно обеспечить достаточную величину осадки, чтобы гарантировать полное заполнение профильного отверстия и предотвратить образование пустот или дефектов, также избыточная величина деформации может привести к разрушению. Для формирования более прочного соединения необходимо минимизировать деформацию выступов профильного отверстия фланца. Для обеспечения данного условия необходимо определенное соотношение между пределами текучести материала бобышки и материала фланца. Тогда можно обеспечить пластическую деформацию бобышки без пластической деформации выступов отверстия фланца.

Отмечается неравномерное формообразование в верхней части и в нижней части бобышки (см. рис. 4). Это, в свою очередь, может быть причиной снижения

ресурса работы ступицы. Для обеспечения равномерного формообразования предлагается низкотемпературный нагрев нижнего инструмента (штампа).

Список литературы

1. Патент № 2368482 РФ. Способ неразъемного соединения / Р.Ш. Галиуллов, А.А. Кочетов. – Заявка №2007139844/02 от 30.03.2007; опубл. 27.09.2009, Бюл. №27.
2. Опёноква Е.А., Петров П.А. Обзор технологий формирования неразъемных соединений методами пластического деформирования // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – №1. – С. 653-666.
3. Опёноква Е.А., Петров П.А. Выбор параметров, влияющих на качество неразъемного соединения, полученного пластическим деформированием. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – №7. – С. 607-610.
4. Аркулис Г.Э. Совместная пластическая деформация разных металлов. – М.: Металлургия, 1964. – 272 с.
5. Коржова О.П. Технология формообразования и сборки профильных неподвижных и подвижных соединений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2008. – 19 с.
6. Опёноква Е.А., Петров П.А. Компьютерная модель процесса формирования неразъемного соединения // Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации: сборник тезисов Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, 13 декабря 2024 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2025. – С. 9-11.
7. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие / Под ред. А.В. Власова. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э.Баумана, 2019. – 383 с.

Сведения об авторах:

Опёноква Екатерина Алексеевна – аспирант;

Петров Павел Александрович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «ОМДиАТ».