

УДК 621.774

Нахайчук О.В.

Музычук В.И.

*(Вінницький державний аграрний університет)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРЕДЕЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

*У роботі представлені наукові підходи до вирішення задач обробки металів тиском щодо процесів, які супроводжуються монотонним і немонотонним деформуванням. Показана можливість застосування феноменологічної теорії деформовності, поєднання різних розрахунково-експериментальних методів для визначення напружено-деформованого стану заготовок на стадіях їх формоутворення.*

*Scientific approaches to the decision of tasks of processing of metals pressure, in relation to the processes, accompanying monotonous and not monotonous deformation are represented in this work. Possibility of application of phenomenological deformability theory, combination of different calculation-experimental methods for determination of the stress-deformed state of purveyances on the stages of their forming is shown.*

### **Введение**

Современный этап развития машиностроения характеризуется созданием новых высоких технологий, особенностями которых является производительность, надёжность, экономичность, экологичность, другие положительные характеристики.

Создание таких технологий вызывает необходимость применения, наряду с известными расчётно-экспериментальными методами, новых подходов для решения различных прикладных задач. Так феноменологическая теория деформируемости позволяет не только определять предельную степень деформации при формообразовании заготовок, а и использованный ресурс пластичности на стадиях формирования и параметры остаточной пластичности, которые, как известно, оказывают определяющее влияние на качество получаемых изделий. Для оценки деформируемости заготовок и обеспечения благоприятной технологической наследственности необходимо знать историю деформирования каждой материальной частицы, то есть функции тензоров напряжений и деформаций от координат и времени.

Новые технологические процессы зачастую сопровождаются сложным немонотонным деформированием, поэтому для качественного их описания необходимо применять критерии разрушения, учитывающие тензорный характер накопления повреждений.

Изложенное является теоретической основой данной работы.

### **Постановка задачи**

Проведённые исследования [1, 2] показали, что совместное использование различных расчётных методик может дать более достоверные результаты по определению интересующих параметров. В наших работах обуславливается возможность применения структурной схема выбора подходов к изучению механики процессов формообразования заготовок (рис. 1) [3, 4], которая включает применение расчётных методов: полей линий скольжения, метода совместного решения уравнений равновесия и условий пластичности, определения напряжённо-деформированного состояния по распределению твёрдости, делительных сеток, метода конечных элементов для решения технологических задач. Развитию данного направления исследований и посвящена представленная работа.

### **Основная часть**

Рекомендуется следующий алгоритм по изучению процессов холодного пластического деформирования в условиях предельного формообразования:

– Выполнение поэтапных экспериментальных исследований с осуществлением разрезов заготовок в различных направлениях; при этом применение метода определения

напряжённно-деформированного состояния по распределению твёрдости даёт возможность изучения полей интенсивности напряжений и деформаций (данная информация может быть использована для расчётов напряжённно-деформированного состояния на различных стадиях формообразования заготовок);

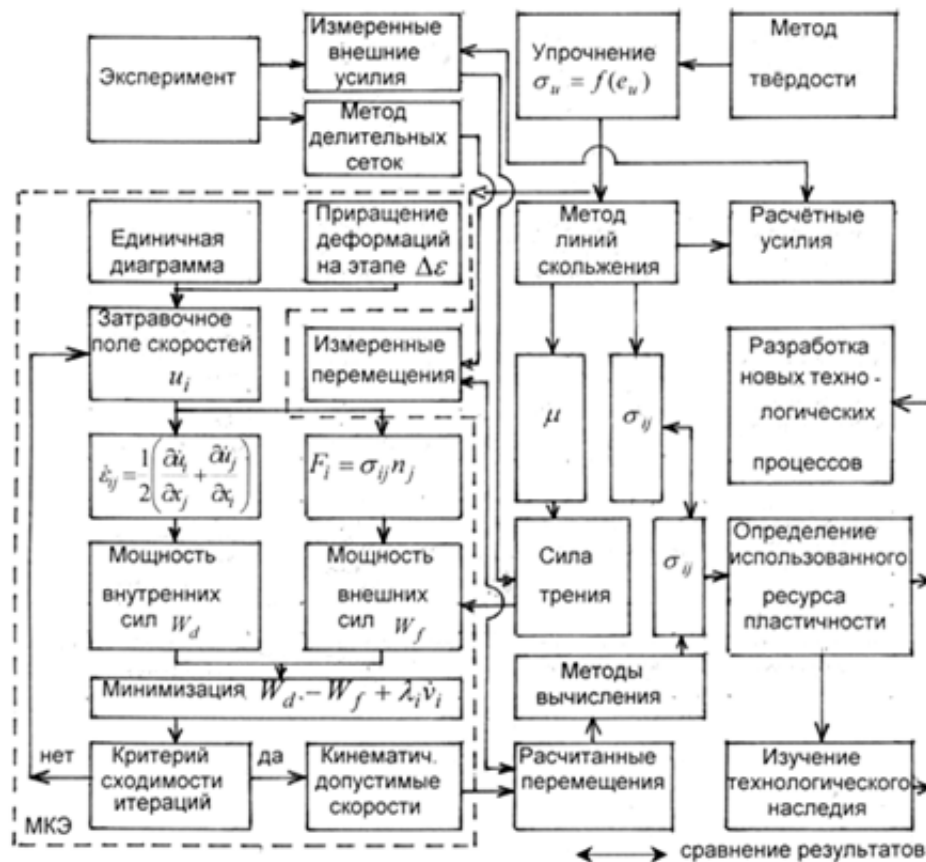


Рис. 1. - Структурная схема подходов к изучению механики процессов формообразования заготовок

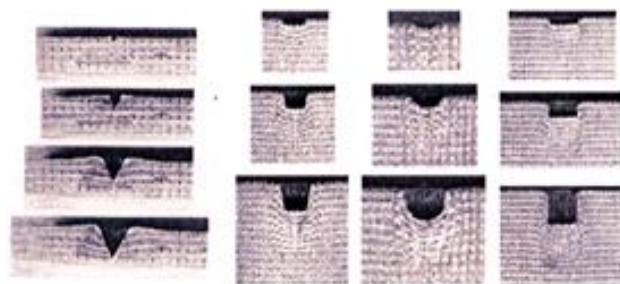


Рис. 2. - Поэтапное формирование профилей при внедрении штампа



Рис. 3. - Разрезы изделия в поперечном и продольном направлениях. Изучение твёрдости на стадиях формирования профиля



**Рис. 4. - Разрез поршня с шатуном в собранном состоянии. Измерение твёрдости при поэтапном формировании пары поршень-шатун**

– Разработка метода делительных сеток - для поэтапного изучения накопленной интенсивности деформации и получения информации о реальной кинематике течения металла. На рис. 2-4 в качестве примера приведены поэтапные исследования при осуществлении моделирования внедрения штампов различных форм, а также экспериментальные исследования процессов формообразования внутреннего шлицевого профиля на трубных заготовках и закатки пары поршень-шатун аксиально-роторного поршневого насоса.

– Разработка методик расчётов напряжённо-деформированного состояния на различных стадиях формообразования заготовок изучаемых процессов при использовании построенных тарировочных графиков  $\sigma_u$ -HV- $\epsilon_u$  (на рис. 3, 4 показано изучение распределения твёрдости по Виккерсу).

– Нахождение характеристик технологического паспорта материала (параметров кривых течений, диаграмм пластичности, кривых Баушингера). Под технологическими функциями свойств материалов мы понимаем экспериментально полученные диаграммы пластичности и кривые течения, которые учитывают пластичность при различных показателях напряжённого состояния и упрочнение материалов. Аппроксимации данных функций могут быть использованы в расчётах. Характеристиками технологического паспорта материалов являются: для кривых течений – коэффициенты  $A$  и  $n$ , где  $A$  – напряжение текучести при деформации, равной “1”,  $n$  – критическая деформация при максимальной нагрузке на кривой растяжения. Связь между значениями интенсивности напряжений – интенсивности деформаций может быть выражена зависимостью  $\sigma_u = Ae_u^n$ . Для диаграммы пластичности – значение предельных деформаций при сжатии  $\epsilon_{p(\eta=-1)}$ , кручении  $\epsilon_{p(\eta=0)}$ , растяжении образцов  $\epsilon_{p(\eta=1)}$ , методика определения которых приведена в работе [5].

Одним из проявлений деформационной анизотропии металлов при их пластическом деформировании является эффект Баушингера. Физическая сущность этого эффекта заключается в снижении сопротивления пластическим деформациям после предварительной пластической деформации противоположного знака. Экспериментальные данные [6] свидетельствуют о зависимости параметра  $\beta$ , характеризующего эффект Баушингера, от вида напряжённого состояния, реализуемого при реверсивном пластическом деформировании. Методики оценки эффекта Баушингера для различных видов напряжённого состояния а также условий немонотонного пластического деформирования приведены в работах [7, 8].

– Определение опасных областей деформирования заготовок с использованием различных показателей напряжённого состояния (опасной областью принимается та, в которой значения показателей напряжённого состояния приобретают максимальные значения с учётом знака). В технологической практике широкое применение нашли феноменологические теории, в основе которых лежит гипотеза о зависимости пластичности от истории нагружения, которая задается в пространстве напряжений. Характеристиками напряжённого состояния могут быть показатели, позволяющие исследовать траектории нагружения не в пространстве тензора напряжений, а в пространстве его инвариантов.

Представляет практический интерес оценка возможности применения диаграмм пластичности, построенных в условиях плоского или линейного напряжённых состояний для оценки деформируемости металлов, деформированных в условиях объёмного напряжённого состояния. Решение такой задачи связано с трудностями, которые возникают при проведении специальных экспериментов в камерах высокого давления. В наших исследованиях показано, что зависимость пластичности от схемы напряжённого состояния можно характеризовать двумя показателями напряженного состояния, а также обосновано, что при объёмном напряжённом состоянии необходимо учитывать влияние на пластичность третьего инварианта тензора напряжений [5, 9, 10]. Указанные ранее подходы предполагают поэтапное определение в опасной области деформирования значений накопленной степени деформации и показателей напряжённого состояния.

– Построение пути деформирования опасной области в координатах: пластичность – показатель напряжённого состояния с дальнейшей её аппроксимацией.

– Определение на стадиях пластического формообразования значений использованного ресурса пластичности по критериям разрушения с применением определённых ранее характеристик технологического паспорта материала и траектории пути деформирования опасной области. При проектировании технологических процессов формообразования заготовок в условиях объёмного напряженного состояния и сложного нагружения необходимо учитывать влияние различных инвариантов тензора напряжений на ресурс пластичности, нелинейность накопления повреждений и немонотонность нагружения. В связи с этим применение и разработка критериев разрушения является перспективным для теории и практики обработки металлов давлением. В работах [7, 10, 11] обосновывается применение критериев, учитывающих историю деформирования, а также содержащих функции показателей напряженного состояния соответственно первого и третьего инвариантов тензора напряжений, а также направляющий тензор повреждений, с помощью которого можно учитывать накопление повреждений в различных геометрических направлениях заготовок. Для расчета по указанным критериям необходимо иметь зависимость пластичности от двух показателей напряжённого состояния.

– Установление аналитических зависимостей между значениями использованных ресурсов пластичности и основными параметрами технологических процессов, формой инструмента.

– Изучение возможности максимального сохранения пластичности в опасной области. Рекомендуется применение двух подходов:

1) выбор материалов с высокими значениями предельных деформаций – при этом следует учитывать, что новые материалы могут иметь большие показатели упрочнения в процессе холодного деформирования в сравнении с традиционно применяемыми для данных заготовок, что может привести к возрастанию усилий и нагрузок на инструмент;

2) использование установленных аналитических зависимостей  $\Psi$  от основных параметров технологического процесса и формы инструмента для изменения направления пути деформирования в отрицательную область показателей напряжённого состояния.

### **Выводы**

1. Обосновано, что для создания и совершенствования новых технологических процессов необходима разработка расчетных методик, с помощью которых представляется возможным еще на стадии проектирования прогнозировать технологическую наследственность заготовок без проведения трудоемких экспериментальных исследований.

2. Представлены подходы к изучению механики процессов формообразования заготовок, включающие применение феноменологической теории деформируемости в сочетании с расчетно-экспериментальными методами и характеристиками технологического паспорта материала.

3. При исследовании технологических процессов, когда формообразование заготовок происходит в условиях объёмного напряженного состояния и сложного нагружения,

необходимо учитывать влияние инвариантов тензора напряжений на ресурс пластичности, нелинейность накопления повреждений и немонотонность нагружения. В связи с этим применение и разработка критериев разрушения является перспективным для теории и практики обработки металлов давлением.

### *Литература*

1. Огородников В.А., Нахайчук О.В. Комплексная методика определения напряжённо-деформированного состояния нестационарных процессов // *Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – Вип. 6. – Маріуполь, 2002. – С. 189-193.*
2. Нахайчук О. В. Методы расчёта процессов холодной обработки давлением // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ: ДДМА. – 2005. – С. 119-123.*
3. Огородников В.А., Нахайчук О.В., Грушко О.В. Комплексное исследование механики формообразования крутоизогнутых отводов // *Проблемы трибологии. – 2000. – №4. – С. 77-84.*
4. Огородников В.А., Нахайчук О.В. Разработка системных подходов к решению задач теории пластичности // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ-Хмельницький: ДДМА. – 2002. – С. 10-12.*
5. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.
6. Хван Д.В., Бочаров В.Б. Исследование эффекта Баушингера при линейном напряжённом состоянии // *Проблемы прочности. – 1989. №7. – С. 112-114.*
7. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении. – К.: УМК 130, 1989. – 152 с.
8. Огородников В.А., Бабак Н.В. Механика немонотонного пластического деформирования // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ: ДДМА. – 2003. – С. 255-259.*
9. Огородников В. А. Деформируемость металла при обработке давлением // *Изв. вузов. Чёрная металлургия. – 1976. – № 3. – С. 74–78.*
10. Огородников В.А., Нахайчук О.В. О влиянии третьего инварианта тензора напряжений на деформируемость в процессах объёмного формообразования // *Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: Сб. тез. междуна. НТК. – БГТУ “Военмех”, Санкт-Петербург, 2005. С. 66-75.*
11. *Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування: / О.В. Нахайчук, О.О. Розенберг, В.А. Огородніков, А.Д. Крицький, В.В. Мельниченко, С.Ф. Студенець. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 158 с.*