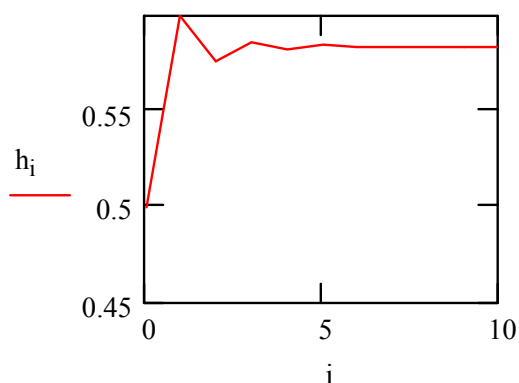
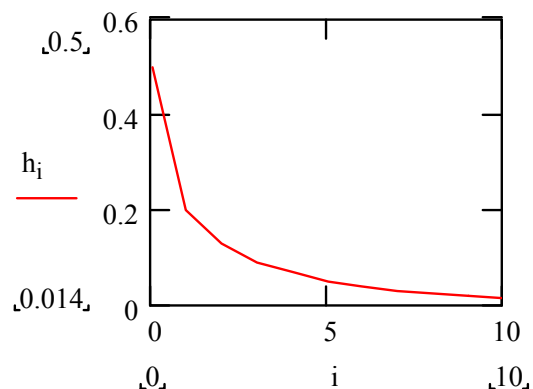




**Рисунок 5 – Стационарный режим обработки,  $\mu=0,6$**



**Рисунок 6 – Отсутствие роста глубины ЗТВ при  $\mu=0,2$**

### Выводы

Методика оптимизации процесса лазерной обработки на основе системно-синергетического анализа состоит в следующем. В отличие от известных теоретических методов решения экстремальных задач оптимизируемой функциональной зависимости, основанных на обращении в нуль производной, предлагается применять рекуррентные соотношения. Параметр оптимизации выбирают по соотношению величин тепловложения и теплоотвода в ЗЛВ. Точку бифуркации определяют по двум близким значениям оптимизируемой переменной вблизи этой области, плавно снижают величину параметра оптимизации и определяют стационарный режим, соответствующий постоянной глубине ЗТВ.

### Литература

1. Босс В. Лекции по математике. Т.7: Оптимизация. Изд.2-е, стереотипное.- М.: КомКнига, 2007.- 216 с.
2. Зуев И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. М.:Издательство МЭИ, 1998.162 с.
3. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику: Учебное руководство.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.,1990.-272 с.
4. Морозов А.Д., Драгунов Т.Н., Войкова С.А. и др. Инвариантные множества динамических систем в Windows. М.: Эдиториал УРСС, 1998.- 240 с.

### **Влияние остаточных напряжений на качество изделий при холодной обработке давлением листовых заготовок**

д.т.н. проф. Коликов А.П., к.т.н. с.н.с. Лютцау А.В., к.т.н. доц. Лисунец Н.Л.,  
к.т.н. проф. Гладков В.И., к.т.н. проф. Шпунькин Н.Ф.  
НИТУ «МИСиС», ОАО «НИИТавтопром», МГТУ «МАМИ»  
8.916.225.64.33, kiod.MAMI.@bk.ru

**Аннотация.** Приводится экспериментальная и расчетная методика и результаты исследования остаточных напряжений при холодной деформации металлов неразрушающим способом рентгеновской дифрактометрии. Описаны результаты оценки качества осесимметричных деталей по критерию остаточных напряжений при их изготовлении многопроходной ротационной вытяжкой листовых заготовок.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, ротационная вытяжка, листовая заготовка, осесимметричные детали, рентгеновский дифрактометр.

Одним из важных технологических направлений в автомобилестроении является лис-

тоштамповочное производство. В связи с этим представляются актуальными результаты исследований зависимости качества деталей от остаточных напряжений на примере изготовления осесимметричных деталей методом холодной ротационной вытяжки.

При изготовлении изделий из листовых заготовок обработкой давлением после снятия нагрузки в их объемах появляются остаточные напряжения. Растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях, особенно в изделиях, работающих при знакопеременных нагрузках, способствуют их усталостному разрушению.

В случае повторной деформации, когда в изделии уже имели место остаточные напряжения  $\sigma_{ост}$ , суммарные напряжения (основные) равны  $\sigma_{осн} = \sigma_p \pm \sigma_{ост}$ , где  $\sigma_p$  – рабочие напряжения при повторной обработке. При расчётах довольно часто действующее напряжение приравнивают к пределу выносливости при симметричном цикле, поэтому может возникнуть ситуация, когда оба вида напряжений являются растягивающими, что может вызвать *коробление, растрескивание и хрупкое разрушение*.

В настоящей статье представлены результаты исследований остаточных напряжений методом рентгеновской дифрактометрии, который является одним из *эффективных неразрушающих методов* определения напряжений в поверхностном слое деталей толщиной до 30-50 мкм [1].

При облучении поверхностных слоев объекта происходит отражение излучения (дифракция), фиксируемое детектором, связанным посредством аналого-цифрового преобразователя с ЭВМ, в которую поступает информация о распределении излучения (т.е. о фактическом, числе импульсов  $N$  за определенный промежуток времени).

При рентгеновской съемке зависимость интенсивности от угла отражения  $\Theta$  представляет собой спектр, в котором выделяются максимумы (пики), соответствующие отражению от кристаллографических плоскостей материала, удовлетворяющих уравнению Вульфа-Брэгга. Получаемый спектр фактически представляет собой гистограмму распределения  $N(\Theta)$  в диапазоне углов отражения.

Первым этапом изучения остаточных напряжений является определение величины *деформации* кристаллической решетки, сущность которого состоит в следующем.

Положение центра тяжести интерференционного максимума (пика) при дифракции  $\Theta_c$  от семейства кристаллографических плоскостей связано с межплоскостным расстоянием  $d$  и длиной волны рентгеновского излучения  $\lambda$  уравнением Вульфа-Брэгга:

$$2d \sin \Theta = n\lambda. \quad (1)$$

При  $n = 1$  (случай наибольшей интенсивности интерференционного максимума) имеем  $2d \sin \Theta = \lambda$ , т.е.

$$\Theta = \arcsin (\lambda / 2d). \quad (2)$$

Деформация кристаллической решетки  $\varepsilon = (d - d_0)/d_0$  (где  $d_0$  и  $d$  – межплоскостное расстояние соответственно до и после деформации) вызывает смещение центра тяжести рентгеновского максимума, соответствующего данной кристаллографической плоскости, на величину, определяемую соотношением:  $\Delta \Theta = -\varepsilon \operatorname{tg} \Theta_{c0}$ .

Продифференцировав уравнение (1) по  $d$  и по  $\theta$  и учитывая, что в правой части все величины постоянны, после его преобразования имеем:

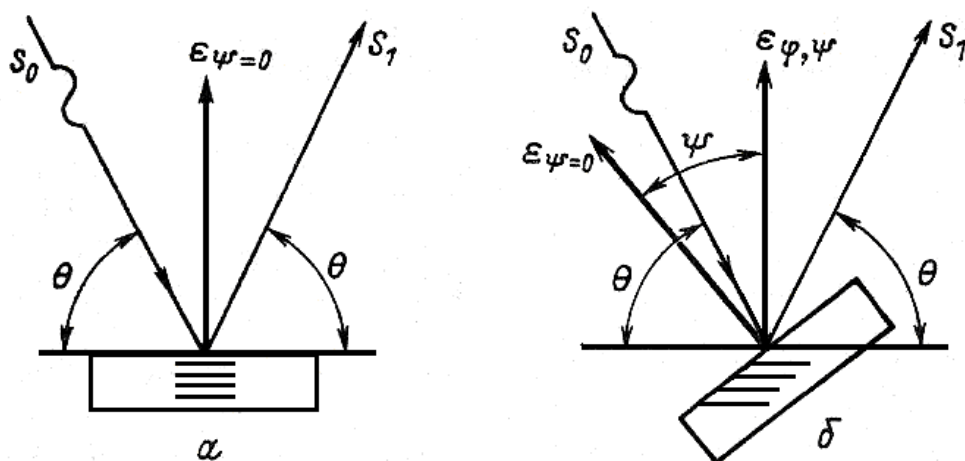
$$\varepsilon = -\Delta \Theta \operatorname{ctg} \Theta_{c0}, \quad (3)$$

где:  $\Theta_{c0}$  – координата центра тяжести максимума, соответствующая недеформированному состоянию материала, а  $\Delta \Theta = \Theta_c - \Theta_{c0}$ .

На втором этапе исследований определяются остаточные напряжения. В случае плосконапряженного состояния ( $\sigma_3 = 0$ ) в поверхностном слое изделия определение суммы главных напряжений ( $\sigma_1 + \sigma_2$ ) на поверхности образца в соответствии с обобщенным законом Гука производится по формуле:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{E}{\mu} \varepsilon = \frac{E(\Theta_c - \Theta_{c0})}{\mu} \operatorname{ctg} \Theta_c, \quad (4)$$

где:  $E$  и  $\mu$  - соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона исследуемого материала;  
 $\varepsilon$  - деформация в направлении, нормальном к исследуемой поверхности;  
 $\Theta_c$  - координата центра тяжести рентгеновского интерференционного максимума, соответствующего среднему расстоянию между кристаллографическими плоскостями напряженного материала, перпендикулярными направлению съемки (рисунок 1);  
 $\Theta_{c0}$  - то же, но для ненапряженного материала (определяется в зависимости от материала и длины волны излучения).



**Рисунок 1 – Схема съемки дифрактограмм при определении углового положения максимума  $\theta$  (град) итерференции рентгеновского излучения на кристаллической решетке материала: а – в исходном и б- в деформированном состоянии детали.**

На основе полученной суммы напряжений определяется эквивалентное напряжение

$$\sigma_{\text{эк}} = -\mu (\sigma_1 + \sigma_2). \quad (5)$$

Для определения величины напряжения  $\sigma_\varphi$  в заданном направлении, которое характеризуется углом  $\varphi$  на поверхности образца, применяют так называемый метод « $\sin^2 \psi$ », который включает следующую последовательность действий:

- исследуемый объект снимают при нескольких (обычно от 3 до 6) значениях угла наклона брэгговской плоскости  $\psi$  к нормали к поверхности объекта (наклоны осуществляются в направлении  $\varphi$ );
- для каждого  $i$ -го значения  $\psi$  определяют координату центра тяжести  $\Theta_{ci}(\psi)$  максимума, соответствующего выбранной кристаллографической плоскости, и методом наименьших квадратов строят линейную зависимость  $\varepsilon$  от  $\sin^2 \psi$  (рисунок 2):

$$\varepsilon = b_0 + b_1 \sin^2 \psi, \quad (6)$$

тангенс угла наклона которой с точностью до коэффициента  $(1+\mu)/E$  дает значение  $\sigma_\varphi$ :

$$\sigma_\varphi = b_1 E / (1+\mu). \quad (7)$$

Для различных металлов и сплавов и длины волны рентгеновского излучения поверхностный слой, который формирует дифракционный пик, имеет глубину от 5 до 250 мкм.

Для реализации метода рентгеновской дифракции при исследовании остаточных напряжений А.В.Лютцау с сотрудниками [2] разработали несколько поколений рентгеновских дифрактометров: портативный «ДРП-РИКОР» и настольный «XMD-300».

В качестве примера применения рассматриваемого метода представлена оценка качества сложнопрофильных осесимметричных изделий (рисунок 3), полученных методом холодной многопроходной ротационной вытяжки [3,4], которое оценивали измерением остаточ-

ных напряжений по всему технологическому циклу: листовая заготовка – деталь.

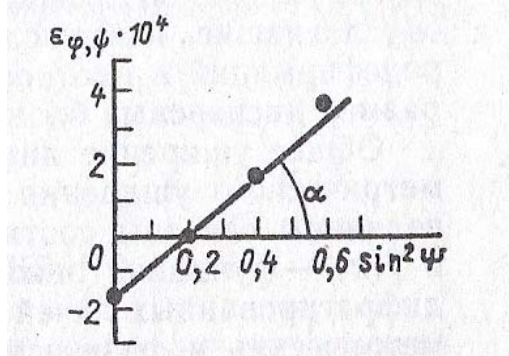


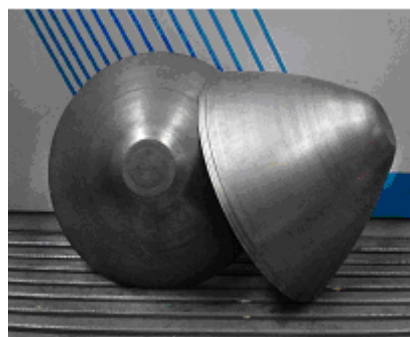
Рисунок 2 – Зависимость  $\varepsilon_{\varphi, \psi}$  от  $\sin^2 \psi$

### Осесимметричные изделия

Экран

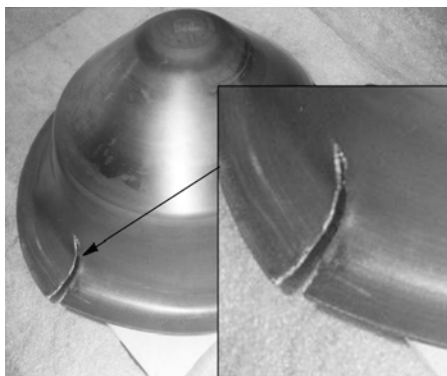


Обечайка



### Дефекты

Радиальные трещины на деталях



Разрывы на деталях

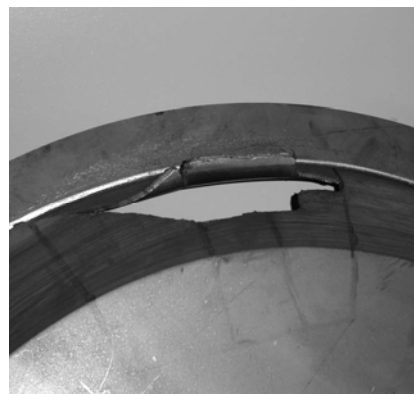
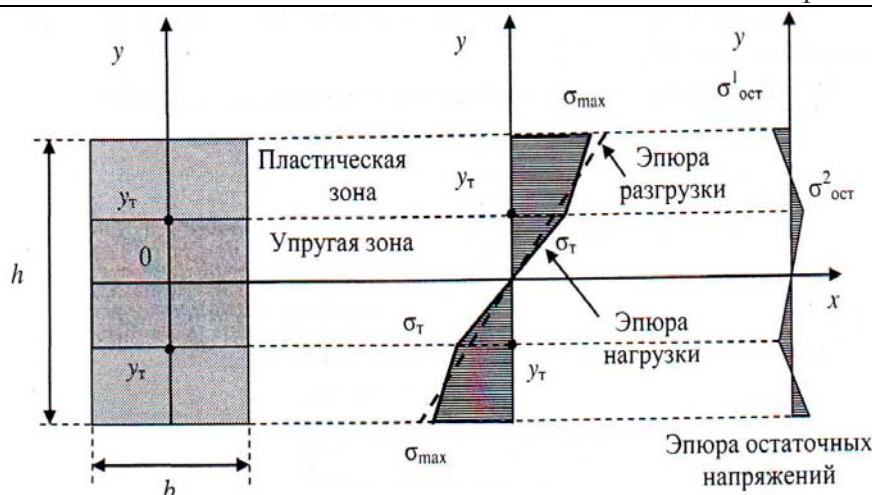


Рисунок 3 – Сложнопрофильные осесимметричные изделия из листовой заготовки, полученные ротационной вытяжкой

Предварительно исследовали остаточные напряжения в образцах из холоднокатаного листа толщиной 0,5 мм. Установлено наличие максимальных напряжений  $+\sigma_{\text{ост}}^{\text{I}} = 170$  МПа на бездефектном участке и  $+\sigma_{\text{ост}}^{\text{I}} = 155$  МПа на участке с дефектом в виде пленки.

Затем оценивали качество деталей, полученных ротационной вытяжкой за 11 –15 проходов, по напряженно-деформированному состоянию и появлению дефектов, таких как радиальные трещины и разрывы (рисунок 3).

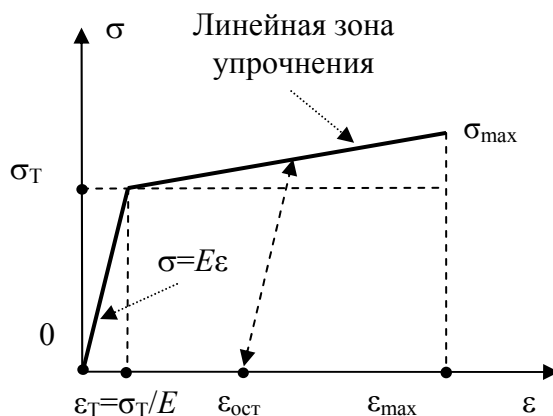
Известно, что ротационная вытяжка относится к операциям с дополнительной локализацией очага деформации с упруго-пластическими зонами (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Распределение остаточных напряжений в сформованной заготовке после снятия нагрузки**

В результате неравномерного распределения суммарной деформации в меридиональном направлении за каждый проход ролика в детали возникают значительные остаточные напряжения, что с потерей пластичности привело к разрушению детали за счет упругопластических напряжений вблизи локального очага деформации, которые суммируются с остаточными напряжениями от предыдущего цикла обработки.

После окончания формовки заготовки и снятия нагрузки основные напряжения  $\sigma_{осн.} = P_{ш.ф.}/F_k$  переходят в остаточные  $\sigma_{ост}$  напряжения (рисунок 4), максимальная величина которых  $\sigma^1_{ост}$  и  $\sigma^2_{ост}$  для принятой линейной упругопластической модели (рисунок 5) рассчитывается по соответствующим формулам.



**Рисунок 5 – Реологическая модель линейной упруго-упрочняющейся среды**

Таким образом, в сформованной детали остаточные напряжения  $\sigma^1_{ост}$  и  $\sigma^2_{ост}$  (рисунок 4) суммируются с остаточными напряжениями в листовой заготовке  $\sigma^л_{ост}$ , которые при многопроходной ротационной вытяжке по величине превышают предел прочности  $\sigma_b$  ( $\sigma_s$ ) деформируемого материала, что приводит к усталостному разрушению изделия [4].

Проведенными исследованиями показана эффективность контроля методом портативной дифрактометрии остаточных напряжений в изделиях в широком диапазоне направления прикладываемых нагрузок.

При разработке технологических режимов рекомендуется учитывать остаточные напряжения как на этапе получения листовой заготовки, так и на этапе изготовления детали способом холодной обработки.

### Литература

1. Лютцау А.В., Котелкин А.В., Звонков А.Д., Матвеев Д.Б. Новые средства диагностики неразрушающего контроля напряженного состояния заготовок и изделий. // В сб. «Пластическая деформация сталей и сплавов» – М.: Изд-во МИСиС, 1996. 436 – 441с.
2. Лютцау А.В., Котелкин А.В., Звонков А.Д., Матвеев Д.Б., Середа В.Н., Каксис Ю.А. Портативные рентгеновские дифрактометры для неразрушающего контроля напряжений в поверхностных слоях объектов техники. // «Контроль. Диагностика», № 1, М. 2000, 18-20с.
3. Корольков В.И. Технология и оборудование процессов ротационной вытяжки. // Воронеж. Изд-во ВГТУ, 1999. 115 с.
4. Лисунец Н.Л. Коликов А.П. Качалин А.А. Исследование влияния технологических факторов ротационной вытяжки на качество заготовок сложнопрофильных деталей из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей. // «Кузнечно-штамповочное производство» 2006, № 5. 24-26 с.

### **Моделирование контакта инструмента с деталью при обработке выглаживанием в программной среде Компас 3D**

д.т.н. проф. Кузнецов В.А., Сазонов Д.А., Смирнов А.В.  
МГТУ «МАМИ»

8 (495) 223-05-23, доб. 1219, 1214, [vak@mami.ru](mailto:vak@mami.ru)

*Аннотация.* В статье рассмотрена проблема максимально точного определения площади контакта инструмента с деталью в процессе обработки выглаживанием наружных цилиндрических поверхностей. В качестве инструмента рассматривались токарные пластины стандартной геометрии (SNMG). Подробно описана методика моделирования контактного взаимодействия, приведены результаты аналитической обработки полученных данных.

*Ключевые слова:* моделирование, обработка выглаживанием, область контакта, САПР.

Моделирование контактного взаимодействия инструмента с деталью было выполнено для метода выглаживания с применением в качестве выглаживателя токарной пластины стандартной геометрии SNMG. Возможность использования режущего инструмента для отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) обусловлено изменением способа установки многогранной неперетачиваемой пластины (МНП). Суть данного метода заключается в том, что токарный резец поворачивают вокруг одной, двух или трех осей на некоторые углы таким образом, чтобы вывести из контакта с деталью режущую кромку МНП и ввести в контакт цилиндрическую поверхность, образованную пересечением главной и вспомогательной задних поверхностей, скругленную некоторым радиусом. Схематично это показано на рисунке 1.

Детальное описание метода обработки выглаживанием с применением МНП стандартного типоразмера приведено в публикациях, указанных в списке литературных источников к данной статье.

Способ моделирования контактного взаимодействия инструмента и детали, о котором идет речь в данной статье, может применяться для исследования различных методов ППД, а не только метода выглаживания с применением МНП.

Моделирование контактного взаимодействия инструмента с деталью в процессе выглаживания позволяет получать данные о площади контактной области, ее конфигурации и размерах, которые можно использовать как при проведении теоретических и экспериментальных исследований, так и при проектировании технологического процесса обработки де-