

## РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.919

Грушко А. В.

### УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ДЕФОРМИРУЮЩЕМ ПРОТЯГИВАНИИ

Качество деталей, получаемых методами холодного пластического деформирования, существенно зависит от технологической истории. В значительной мере оно определяется такими параметрами, как точность геометрии, шероховатость поверхности, остаточная пластичность материала, остаточные напряжения, отсутствие трещин, гофров, линий скольжения и деформационным упрочнением. При деформирующем протягивании (рис. 1) [1–3] происходит интенсивное упрочнение поверхностного слоя, характеризуемое высокими степенями и градиентом деформаций, остаточными напряжениями сжатия и невысоким ресурсом пластичности, что благоприятно сказывается на технологическом наследии деталей, работающих в условиях циклических нагрузок и трения. Согласно [1, 3] упрочнение поверхностного слоя может выступать комплексным параметром, который можно поставить в соответствие с другими параметрами для дальнейшей оценки качества на стадии проектирования технологического процесса.

В работах [1, 3] всесторонне исследовалась механика деформирующего протягивания, в том числе и упрочнение поверхностного слоя. Применялись экспериментальные и экспериментально-расчетные методы теории пластичности: метод твердости, визиопластичности, метод линий скольжения с рядом гипотез. В результате, получены графические зависимости интенсивности накопленных деформаций от угла инструмента и натяга на сторону для некоторых исследованных заготовок (рис. 2). Авторы при этом отмечают слабое влияние иных параметров технологического процесса. Однако, моделирование процесса методом конечных элементов (МКЭ) без применения упрощающих гипотез показало более сложные связи технологических параметров на деформационное упрочнение поверхностного слоя, особенно при малых натягах.

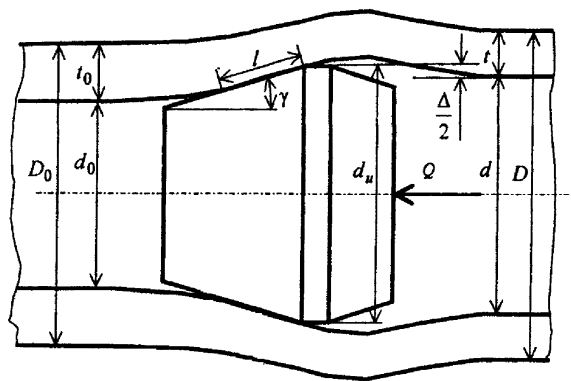


Рис. 1. Схема и основные параметры деформирующего протягивания

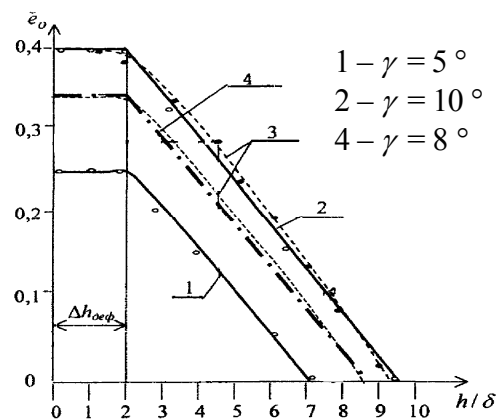


Рис. 2. Зависимости накопленных деформаций от относительной глубины поверхностного слоя заготовки и угла конусности инструмента  $\gamma$  [1]

Укажем основные факторы, оказывающие влияние на механику процесса деформирующего протягивания:

- натяг на диаметр  $a$  (на радиус или на сторону  $\delta = 0,5a$ );
- толщина стенки заготовки  $s$ ;
- внутренний диаметр заготовки (исходный)  $d_0$ ;
- угол конусности деформирующего инструмента  $\gamma$ ;
- коэффициент трения  $f$  по Кулону;
- модуль упрочнения материала  $A$ ;
- показатель упрочнения материала  $n$ ;
- количество циклов деформирования  $z$ .

Целью данной работы является изучение процесса деформирующего протягивания МКЭ с точки зрения упрочнения поверхностного слоя и его зависимости от основных технологических параметров и свойств материала при малых натягах.

Решали поставленную задачу явным методом [4]. Использовали осесимметричную постановку задачи. Применяли модель трения по Кулону с ограничением контактных касательных напряжений напряжением текучести при сдвиге. Свойства материала задавали в виде упругих констант изотропного материала и кривой течения.

Кривые течения обычно аппроксимируют различными функциями, в зависимости от особенностей поведения материала. На наш взгляд, как в экспериментально-теоретических, так и численных расчетах при деформациях, существенно превышающих деформацию предела текучести, достаточную для большинства квазимонотонных процессов обработки давлением точность дает аппроксимация П. Людвикиа [4, 5]:

$$\sigma_i = A e_i^n, \quad (1)$$

где  $A$  и  $n$  – модуль и показатель упрочнения материала;

$\sigma_i$ ,  $e_i$  – интенсивность напряжений и деформаций.

На рис. 3 представлены эпюры интенсивности деформаций при протягивании заготовки из стали 20Х, диаметр внутренний  $d = 36$  мм, толщина стенки  $s = 36$  мм, угол инструмента  $\gamma = 10^\circ$ , натяг на сторону  $\delta = 0,6$  мм, исследованной в работе [1]. Общая картина распределения рассмотренных величин соответствует результатам [1], подсчитанные деформирующие усилия хорошо согласуются с экспериментом (расхождение составило 10 %).

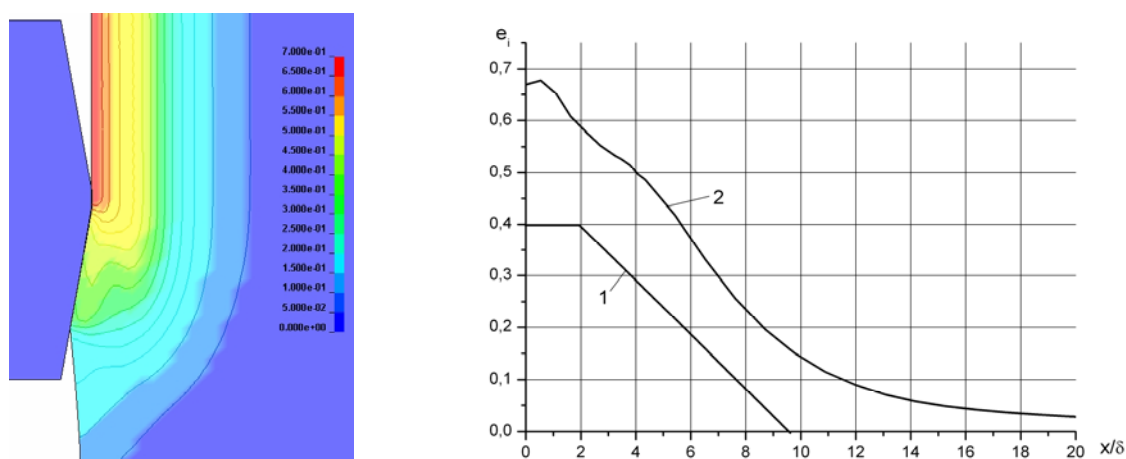


Рис. 3. Распределение интенсивности накопленных деформаций, полученных по МКЭ (кривая 2) и данных работы [1] (методы твердости и сеток) (кривая 1)

Сопоставление экспериментальных данных распределения деформаций, полученных методами твердости и визиопластичности, с графиками МКЭ (рис. 3), указывает на их качественное соответствие.

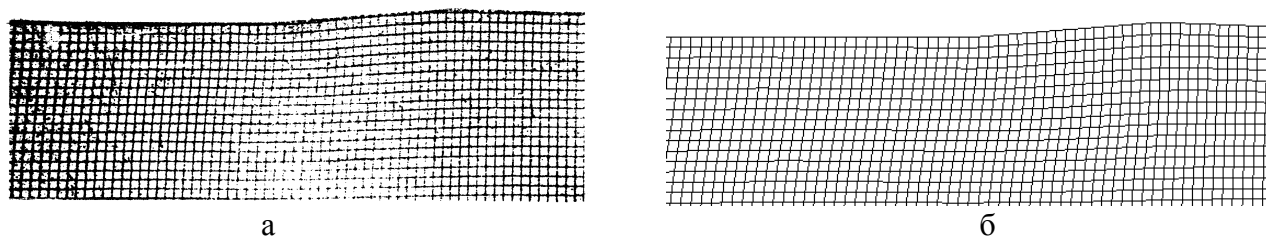


Рис. 4. Искраженная делительная сетка в натурном эксперименте (а) [1] и при моделировании МКЭ (б). Заготовка  $d = 36$  мм,  $s = 36$  мм,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\delta = 0,6$  мм, сталь 20Х

На рис. 5 показаны графики распределения твердости феррита [3] и интенсивности деформаций по МКЭ заготовки из стали 20 при натяге 0,05 мм. Учитывая корреляцию между твердостью и интенсивностью накопленных деформаций [1], отметим, что по МКЭ глубина распространения пластических деформаций существенно больше – в 2 раза и более. Абсолютная величина деформаций осталась не изученной, в связи с отсутствием тарировочных графиков материала заготовки, который, как известно, сильно зависит от партии материала и термообработки. Таким образом, можно говорить также о качественном соответствии этих двух графических зависимостей.

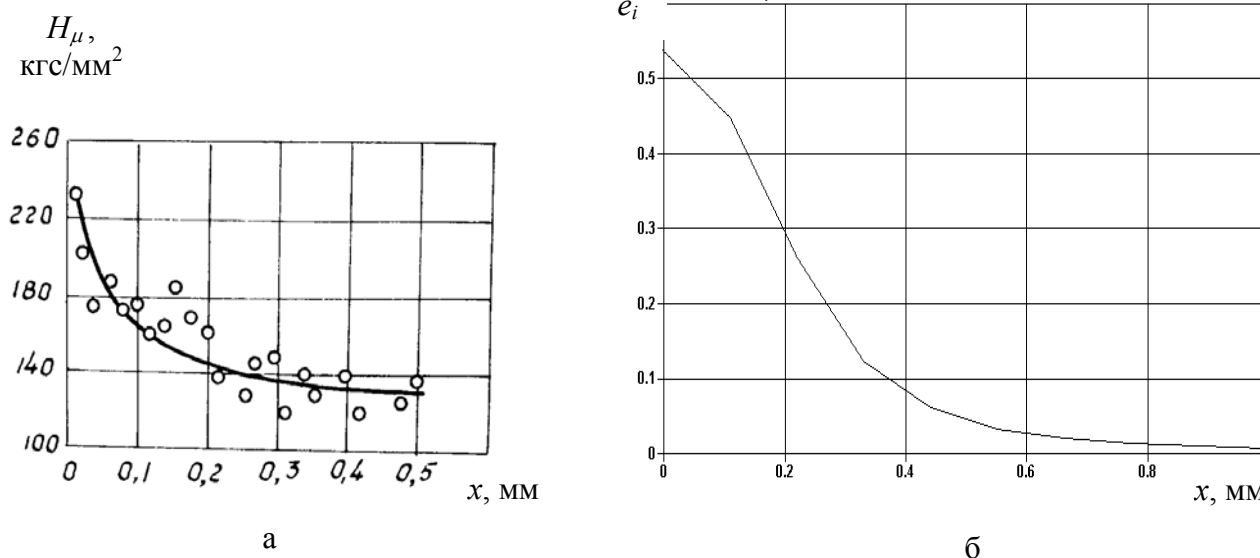


Рис. 5. Упрочнение в заготовке из стали 20 при натяге 0,05 мм, толщине стенки 7 мм и внутреннем диаметре 35 мм:

а – распределение микротвердости феррита; б – распределение интенсивности деформаций по МКЭ

Укажем возможные причины такого расхождения. Они связаны как с особенностями метода твердости, сеток, так и с методом конечных элементов.

1) Процесс протягивания в пластической области реализует сложное немонотонное нагружение металла. Твердость достаточно хорошо коррелирует с деформациями при простом и несколько хуже при сложном монотонном деформировании. Немонотонное нагружение, сопровождается проявлением эффекта Баушингера, деформированное состояние не соответствует однозначно напряженному [6]. Количественное оценивание деформированного состояния заготовки по методу твердости в таком случае представляется весьма приближенным. Деформации, оцененные по методу твердости, могут быть существенно занижены. Отметим также большой естественный статистический разброс показаний измеряемой твердости, что дополнительно вносит погрешность в определение деформаций.

2) Искраженная делительная сетка, полученная в натурном эксперименте и при моделировании МКЭ (рис. 4) дает удовлетворительное соответствие рассчитанного деформированного

состояния. Деформации, посчитанные по методу сеток, дают меньшие значения, чем по МКЭ. Здесь следует принять во внимание нарушение континуальности заготовки при реализации эксперимента метода сеток и погрешности измерений и обработки результатов.

3) Решение задачи МКЭ основано на идеальности свойств материала – начально изотропный материал с изотропным упрочнением согласно аппроксимации (1). Однако задание материала со способностью к анизотропному упрочнению для ряда заготовок существенно не повлияло на расчет деформированного состояния.

4) При малых натягах на кинематику деформирования оказывает влияние поверхностная микронеровность заготовки – шероховатость, которой в МКЭ пренебрегали, считая поверхность идеально гладкой.

5) Действительно реализуемая модель трения при взаимодействии инструмента с заготовкой является достаточно сложной и окончательно не исследованной [1, 3]. В МКЭ использована приближенная модель трения по Кулону с ограничением контактных касательных напряжений напряжением текучести при сдвиге.

6) Накопленная ошибка расчета контактных высоконелинейных задач, при наличии пластических деформаций, МКЭ может составлять до 15 % при прочих корректно заданных данных и условий расчета.

Таким образом, модель, полученная по МКЭ, позволит выявить качественное влияние рассматриваемых факторов на упрочнение поверхностного слоя.

Отнесем все линейные размеры к толщине стенки заготовки для дальнейшей работы с безразмерными величинами, исключением толщины стенки из варьируемых параметров и расширением модели. Обозначим относительный натяг на сторону  $\bar{\delta} = \delta / s$ ; относительный диаметр  $\bar{d} = d / s$ . В дальнейшем, все относительные величины обозначены чертой сверху.

Распределение интенсивности деформаций в радиальном направлении (обозначено  $x$ ) по расчету носит экспоненциально убывающий характер (см. рис. 3, 5). Путем многочисленных переборов различного вида функций с применением ЭВМ, установлено, что наименьшие отклонения в смысле наименьшей суммы квадратов дает экспоненциально-степенная функция в виде (рис. 6):

$$e_i = D \cdot \exp(-B \cdot \bar{x}^m), \quad (2)$$

где  $e_i$  – интенсивность накопленных логарифмических деформаций в точке с относительной координатой  $\bar{x}$ ,  $\bar{x} = x / s$ ;

$D = e_{i \max}$  – интенсивность логарифмических деформаций на поверхности заготовки (при  $\bar{x} = x = 0$ );  $B$  и  $m$  – эмпирические коэффициенты.

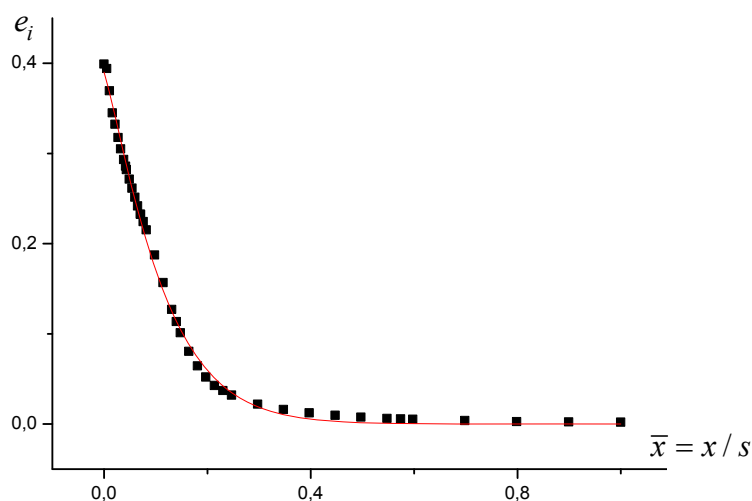


Рис. 6. Характерное распределение интенсивности деформаций (метками отмечены расчетные точки по МКЭ, линия – аппроксимация, согласно (2))

Значения  $e_{i\max}$ ,  $B$  и  $m$  рассчитываются путем статистической обработки данных, полученных МКЭ, с использованием метода наименьших квадратов. С целью осреднения значений  $e_{i\max}$ ,  $B$  и  $m$  следует обрабатывать несколько сечений с расчетными данными. Отметим незначительное отклонение этих коэффициентов (не более 3 %) при 95 % уровне доверительного интервала.

Коэффициенты  $B$  и  $m$  не имеют достаточно ясного физического смысла, что затрудняет их анализ в зависимости от варьируемых параметров. Поэтому, укажем две точки функции, связанные с деформацией и расстоянием от поверхности заготовки. На наш взгляд, достаточно удобными точками являются:

а) расстояние  $\bar{x}_{1/2}$ , на котором деформации достигают половины значения на внутренней поверхности, т. е.  $e_i(\bar{x}_{1/2}) = (1/2)D = (1/2)e_{i\max}$ ;

б) расстояние  $\bar{x}_{1/8}$ , на котором деформации достигают 1/8 значения на поверхности, т. е.  $e_i(\bar{x}_{1/8}) = (1/8)D = (1/8)e_{i\max}$ .

Таким образом, упрочнение заготовки определится тремя параметрами с ясным физическим смыслом  $e_{i\max}$ ,  $\bar{x}_{1/2}$ ,  $\bar{x}_{1/8}$  при аппроксимации функцией (2).

Параметр  $\bar{x}_{1/2}$  может характеризовать интенсивность убывания деформаций от поверхности, т. е. максимальный относительный градиент деформаций у поверхности или угол наклона интенсивно «испадающей» части графика.

Абсолютное значение градиента:

$$\text{grad } e_i = \frac{de_i}{dx} \approx \frac{0,5e_{i\max}}{x_{1/2}}.$$

Относительный градиент поверхностных деформаций:

$$\overline{\text{grad } e_i} \approx 0,5(\bar{x}_{1/2})^{-1}; \quad \text{grad } e_i = \overline{\text{grad } e_i} \frac{e_{i\max}}{s}.$$

Чем меньше величина  $\bar{x}_{1/2}$ , тем интенсивнее уменьшаются деформации от поверхности и тем выше градиент деформаций.

Параметр  $\bar{x}_{1/8}$  может характеризовать глубину распространения условных пластических деформаций от поверхности, т. е. «ширину» графика. Значение 1/8 принято исходя из удобства измерения  $\bar{x}_{1/8}$  и достаточной статистической надежности этой точки на основе анализа полученных графиков. Чем больше эта величина, тем на большую глубину металл пластически деформирован. Параметр  $\bar{x}_{1/8}$  коррелирует с глубиной распространения пластических деформаций  $\bar{x}_{0,002}$  по инженерному значению 0,002. Однако  $\bar{x}_{0,002}$  имеет достаточно большие доверительные интервалы и при определенных натягах выходит за пределы заготовки – когда весь металл пластически деформирован, что создает определенные неудобства в практических расчетах.

Путем несложных математических преобразований получена связь рассмотренных величин с коэффициентами функции (2):

$$\bar{x}_{1/2} = \left( \frac{\ln 0,5}{-B} \right)^{\frac{1}{m}}; \quad \bar{x}_{1/8} = \left( \frac{\ln 0,125}{-B} \right)^{\frac{1}{m}};$$

$$\bar{x}_{0,002} = \left( \frac{\ln(0,002/e_{i\max})}{-B} \right)^{\frac{1}{m}} = \left( \frac{\ln(0,002/e_{i\max})}{0,6931 \cdot \bar{x}_{1/2}^{-1} \left[ 0,9102 \cdot \ln \frac{\bar{x}_{1/8}}{\bar{x}_{1/2}} \right]} \right)^{\frac{1}{m} \cdot 0,9102 \cdot \ln \frac{\bar{x}_{1/8}}{\bar{x}_{1/2}}}.$$

Деформации на внешней поверхности при  $\bar{x} = 1$ :

$$e_{i1} = D \cdot \exp(-B) = e_{i\max} \cdot \exp \left[ -0,6931 \cdot \bar{x}_{1/2}^{-1} \left/ \left[ 0,9102 \cdot \ln \frac{\bar{x}_{1/8}}{\bar{x}_{1/2}} \right] \right. \right].$$

## ВЫВОДЫ

На деформационное упрочнение оказывают влияние такие параметры технологического процесса: натяг; толщина стенки заготовки; внутренний диаметр заготовки; угол конусности деформирующего инструмента; коэффициент трения по Кулону; модуль упрочнения материала; показатель упрочнения материала; модуль Юнга, коэффициент Пуассона и количество циклов деформирования.

Распределение интенсивности деформаций в поверхностном слое носит экспоненциально убывающий характер, согласно зависимости (2). Модель (2) позволят описывать деформационное упрочнение в достаточно широком диапазоне параметров, охватывающем возможное практическое применение протягивания. Коэффициенты модели имеют ясный физический смысл, связанный с максимальным упрочнением, градиентом деформаций и глубиной пластически деформированного слоя.

Глубина деформированного слоя и максимальное упрочнение  $e_{i\max}$ , согласно расчету по МКЭ, существенно превышает (в 1,5–3 раза) значения, полученные при изучении методами твердости и визиопластичности. Проверка данного вопроса требует отдельного изучения и постановки специальных экспериментов. Уточнение приведенных выше моделей в таком случае возможно путем введения соответствующих поправочных коэффициентов.

В дальнейшем, с целью выяснения влияния основных параметров процесса деформирующего протягивания на коэффициенты  $e_{i\max}$ ,  $\bar{x}_{1/2}$ ,  $\bar{x}_{1/8}$ , предпочтительно использование методов планирования эксперимента [5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цеханов Ю. А. Технологическая механика деформирующего протягивания / О. А. Розенберг, Ю. А. Цеханов, С. Е. Шейкин. – Воронеж : Воронеж. гос. технолог. акад. 2001. – 203 с.
2. Розенберг О. А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании / О. А. Розенберг. – К. : Наук. думка, 1981. – 288 с.
3. Цеханов Ю. А. Механика деформирующего протягивания как научная основа оценки качества деталей и работоспособности инструмента с износостойкими покрытиями : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / Цеханов Юрий Александрович. – Воронеж, 1993. – 385 с.
4. Иванов К. М. Метод конечных элементов в технических задачах ОМД : учебное пособие / К. М. Иванов, В. С. Шевченко, Э. Е. Юргенсон. – СПб. : Институт машиностроения, 2000. – 217 с.
5. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение; София : Техника, 1980. – 304 с.
6. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.
7. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.
8. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.

Грушко А. В. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ.

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

E-mail: grushko@svitonline.com