

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАКЛЕПА ПРИ ДЕФОРМИРУЮЩЕМ ПРОТЯГИВАНИИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ

Грушко А. В.

Целью исследования является поиск регрессионных моделей максимального упрочнения, градиента деформаций и толщины деформированного слоя в зависимости от технологических параметров при деформирующем протягивании толстостенной трубчатой заготовки. Получены квадратичные модели максимального упрочнения, градиента деформаций и толщины деформированного слоя в зависимости от технологических параметров: натяга, угла конусности дорна, толщины стенки и диаметра заготовки, количества циклов протягивания, коэффициента трения и кривой течения (модуль и показатель упрочнения по П. Людвигу). Выявлены наиболее влияющие факторы на функции отклика. Показано поведение исследованных функций от ее аргументов. Угол конусности наиболее влияет на максимальную деформацию упрочнения, относительный натяг – на глубину деформированного слоя. Согласно полученной модели для обеспечения необходимого упрочнения необходимо варьировать одновременным изменением факторов влияния.

Метою дослідження є пошук регресійних моделей максимального зміцнення, градієнта деформацій і товщини деформованого шару залежно від технологічних параметрів при деформуючому простягуванні товстостінної трубчастої заготовки. Отримані квадратичні моделі максимального зміцнення, градієнта деформацій і товщини деформованого шару залежно від технологічних параметрів: натягу, кута конусності дорну, товщини стінки і діаметру заготовки, кількості циклів протягування, коефіцієнта тертя і кривої течії (модуль і показник зміцнення за П. Людвігом). Виявлені найбільш впливаючі чинники на функції відклику. Показана поведінка досліджених функцій від її аргументів. Кут конусності найбільш впливає на максимальну деформацію зміцнення, відносний натяг – на глибину деформованого шару. Згідно отриманої моделі для забезпечення необхідного зміцнення необхідно варіювати одночасною зміною впливу.

The aim of the research is to find the regression models of maximum hardening, strain gradient and the thickness of the deformed layer, depending on the process parameters during deforming pulling heavy wall pipe. Quadratic models of maximum hardening, strain gradient and the thickness of the deformed layer are obtained depending on the process of the parameters: tension, angle of the tool, wall thickness, diameter of the workpiece, the friction coefficient, the number of cycles and the pull of the flow curve (modulus and hardening rate by P. Ludwig). The most influencing factors on the response function are identified. The features of the researched function behavior depending on their arguments are shown. The taper angle tool influences the maximum deformation of hardening, the relative tightness influences the depth of the deformed layer. To provide the necessary reinforcement according to the obtained model, it is necessary to vary the simultaneous change in the factors of influence.

Грушко А. В.

д-р техн. наук, проф. ВНТУ,
grushko@svitonline.com

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

УДК 621.919

Грушко А. В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАКЛЕПА ПРИ ДЕФОРМИРУЮЩЕМ ПРОТЯГИВАНИИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ

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. Деформирующее протягивание нашло применение для обработки отверстий в деталях из пластичных материалов. При этом увеличивается диаметр отверстия и наружный диаметр детали, исправляются неточности формы, выглаживается поверхность. При деформирующем протягивании (рис. 1) [1–3] происходит интенсивный наклеп поверхностного слоя, характеризуемый высокими степенями и градиентом деформаций, остаточными напряжениями сжатия и невысокой степенью использованного запаса пластичности, что благоприятно сказывается на технологическом наследии деталей работающих в условиях циклических нагрузок и трения. Согласно [2–7] наклеп поверхностного слоя может выступать комплексным параметром, который можно поставить в соответствие с другими параметрами для дальнейшей оценки качества на стадии проектирования технологического процесса. Если основная задача, стоящая перед технологом – создание благоприятного технологического наследия, то назначаются соответствующие режимы, при которых, как правило, пластические деформации не достигают внешних слоев обрабатываемой трубы. Такие трубы принято называть толстостенными, которым соответствуют режимы обработки заготовки с малыми натягами на инструмент – порядка 0,1–1 % толщины стенки.

В работах [2–4] 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. В результате, получены графические зависимости интенсивности накопленных деформаций от угла инструмента и натяга на сторону для некоторых исследованных заготовок. Авторы, при этом, отмечают слабое влияние иных параметров технологического процесса. Однако, моделирование процесса методом конечных элементов (МКЭ) без применения упрощающих гипотез [8] показало более сложные связи технологических параметров на деформационное упрочнение поверхностного слоя, особенно при малых натягах. Имеющиеся теоретические решения и обширные экспериментальные исследования, выполненные в [1–3, 7], не позволяют с необходимой для инженерных расчетов точностью определять величину наклепа, а именно, его глубину и интенсивность, в зависимости от влияющих факторов, что снижает практическую ценность таких результатов. Одним из наиболее эффективных на сегодняшний день методов исследования процессов пластического формирования является МКЭ, а в обнаружении функциональных связей и поиске оптимальных условий – метод планирования экспериментов. Сочетая данные методы, с применением феноменологических подходов технологической механики, появляется возможность разработки необходимых инженерных моделей.

Целью данной работы является получение математической модели расчета глубины и интенсивности наклепа деформированного слоя толстостенных трубчатых заготовок при их обработке деформирующим протягиванием, в зависимости от основных технологических параметров с учетом свойств материала.

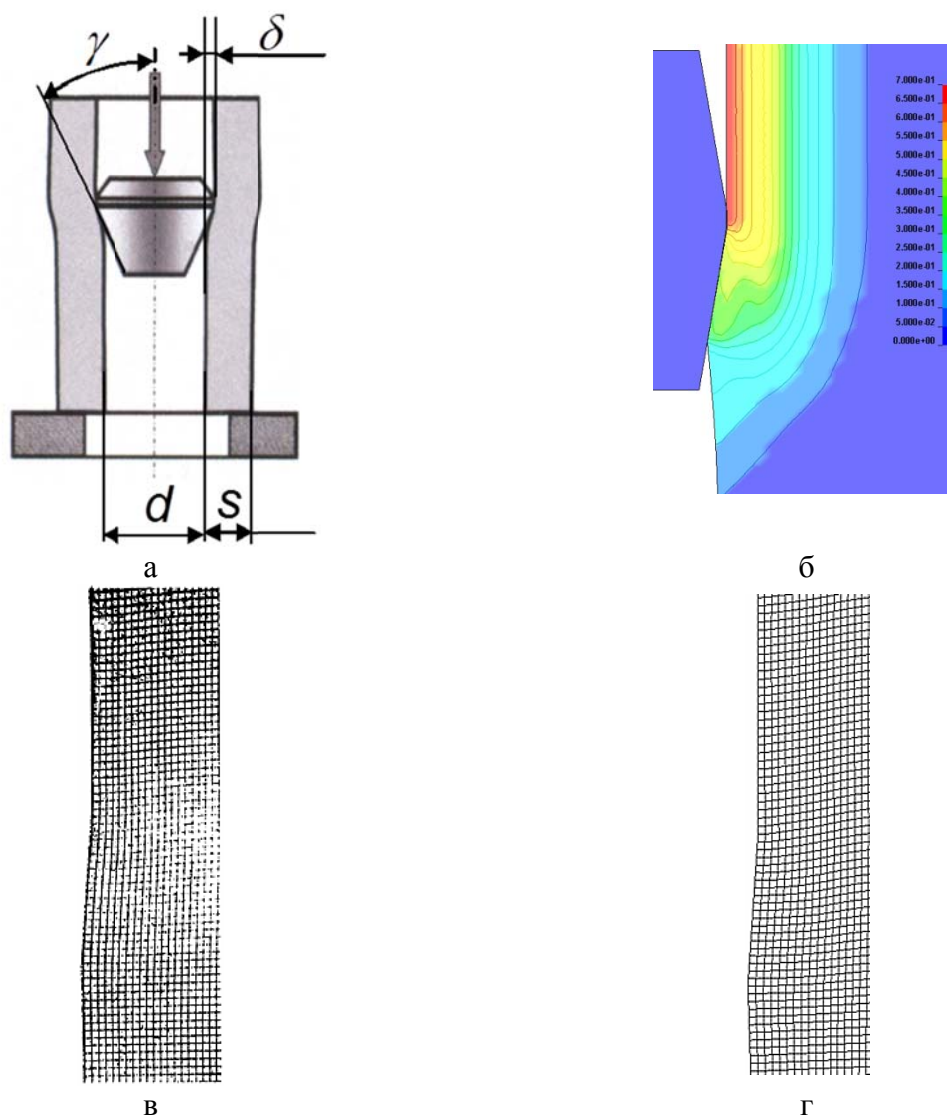


Рис. 1. Схема деформирующего протягивания (а), распределение интенсивности накопленных деформаций по МКЭ (б), деформированная сетка в натурном образце (в), деформированная сетка конечных элементов (г)

В работе [8] установлено, что распределение интенсивности деформаций в радиальном направлении (обозначено x) носит экспоненциально убывающий характер (рис. 2, а), соответствующая функции

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

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 $\bar{x} = x = 0$);

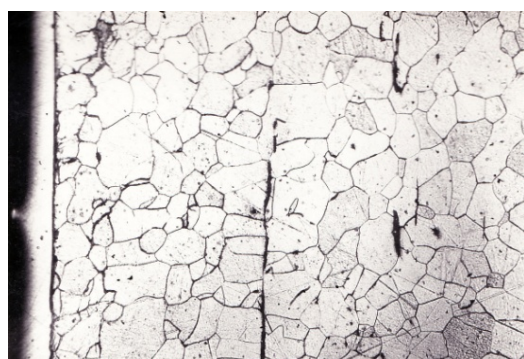
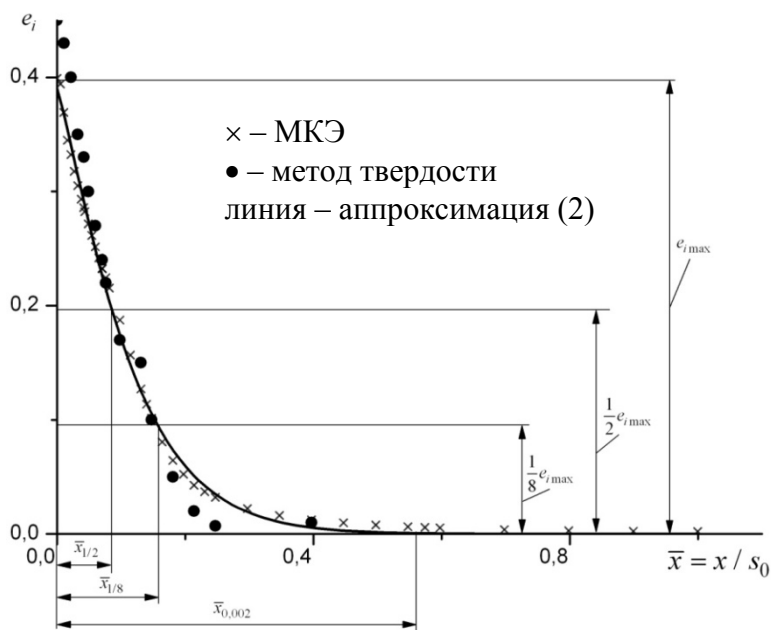
B и m – эмпирические коэффициенты.

Коэффициенты B и m не имеют достаточно ясного физического смысла, и имеют большие доверительные интервалы, что затрудняет их анализ в зависимости от варьируемых параметров. Поэтому, предлагается использовать более стабильные параметры с ясным физическим смыслом – $\bar{x}_{1/2}$, $\bar{x}_{1/8}$ – относительные толщины слоя с упрочнением, соответственно равным половине и 1/8 значения на внутренней поверхности (рис. 2).

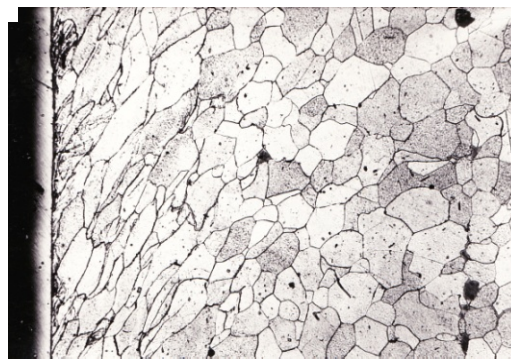
Параметр $\bar{x}_{1/2}$ характеризует максимальный относительный градиент деформаций у поверхности $\overline{\text{grad } e_i} \approx 0,5(\bar{x}_{1/2})^{-1}$. Абсолютный градиент поверхностных деформаций:

$$\text{grad } e_i = \overline{\text{grad } e_i} \frac{e_{i \max}}{s} \quad (3)$$

Чем меньше величина $\bar{x}_{1/2}$, тем интенсивнее уменьшаются деформации от поверхности и тем выше градиент деформаций. Параметр $\bar{x}_{1/8}$ коррелирует с глубиной распространения пластических деформаций $\bar{x}_{0,002}$ по инженерному значению 0,002. Чем больше $\bar{x}_{1/8}$, тем на большую глубину металл пластически деформирован. $\bar{x}_{1/2}$, $\bar{x}_{1/8}$, $\bar{x}_{0,002}$, $\text{grad } e_i$ выражаются из (2) через элементарные алгебраические преобразования.



б



в

Рис. 2. Характерное распределение интенсивности деформаций в поверхностном слое (а); фотографии микроструктуры до (б) и после (в) протягивания (армко-железо)

С целью выяснения влияния основных параметров процесса деформирующего протягивания на $e_{i \max}$, $\bar{x}_{1/2}$, $\bar{x}_{1/8}$ воспользуемся методом планирования эксперимента [9]. Выделены основные влияющие аргументы и пределы их изменения, в соответствии с рекомендациями работ [1, 3]. Все линейные параметры отнесены к начальной толщине стенки заготовки s_0 :

- толщина стенки заготовки $5 \leq s_0 \leq 100$ мм ($\bar{s}_0 = 1$);
- натяг на сторону $0,05 \leq \delta \leq 1$ мм (относительный натяг $\bar{\delta} = \delta / s_0$, $0,001 \leq \bar{\delta} \leq 0,01$);
- внутренний диаметр заготовки $5 \leq d \leq 150$ мм (относительный диаметр $\bar{d} = d / s_0$, $0,5 \leq \bar{d} \leq 2$);
- угол конусности инструмента $5^0 \leq \gamma \leq 10^0$;
- коэффициент трения по Кулону $0,05 \leq f \leq 0,15$;
- модуль упрочнения материала $500 \leq A \leq 1500$ МПа;
- показатель упрочнения материала $0,1 \leq n \leq 0,5$;
- количество циклов протягивания z .

Предварительное моделирование МКЭ показало существенную нелинейность функций отклика, поэтому последнюю искали в виде полинома второй степени:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^6 a_i X_i + \sum_{i=1}^6 a_{ii} X_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq 6} a_{ij} X_i X_j. \quad (4)$$

Также установлено, что при многоцикловом протягивании и суммарных натягах, не приводящих к увеличению внешнего диаметра более чем на 1-2%, отмечается линейный принцип суммирования деформаций, т. е. $e_{i \max z} = z \cdot e_{i \max}$, $\bar{x}_{1/2z} = \bar{x}_{1/2}$, $\bar{x}_{1/8z} = \bar{x}_{1/8}$, где z – количество циклов протягивания. Это позволило исключить z из строимой модели.

Таким образом, для построения искомой модели использовали дробный 6-ти факторный эксперимент, центральный композиционный план 2^{6-1} с центрированными звездными точками (см. табл. 1) [9], требующему реализации 45 опытов. Расчет одного опыта МКЭ (LS-DYNA) занимал в среднем 2,5–3,5 часа машинного времени на персональном компьютере.

Таблица 1

Кодирование влияющих факторов

Коды факторов	Влияющие факторы					
	$\bar{\delta}$	\bar{d}	f	$\gamma, ^\circ$	A , МПа	n
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
Минимальное значение (-1)	0,001	0,5	0,05	5	500	0,1
Максимальное значение (1)	0,01	2	0,15	10	1500	0,5
Звездная точка (0)	0,0055	1,25	0,1	7,5	1000	0,3

Путем обработки данных с применением пакета программ Statistica, получены коэффициенты нелинейной регрессионной модели (4), представленные в табл. 2.

$$e_{i \max} = Y(a_i, X_i), \quad \bar{x}_{1/2} = Y(b_i, X_i), \quad \bar{x}_{1/8} = Y(c_i, X_i) \quad (5)$$

Погрешность модели (5) не превышает 5–8 % при 95 % уровне значимости, что достаточно для большинства практических задач. Также, с целью выяснения наиболее сильно влияющих факторов на изучаемые величины построены диаграммы Парето.

В частности, на $e_{i \max}$ наибольшее влияние оказывает угол конусности инструмента. При этом отмечено большое количество парных взаимодействий угла инструмента с прочими факторами (табл. 2). Отметим, что максимальное упрочнение в изученной области $e_{i \max} = 1,17$. Наименьшее значение – $e_{i \max} = 0,22$.

Таблица 2

Коэффициенты регрессионной модели (5) в натуральном масштабе

Факторы	Коэффициенты модели			Факторы	Коэффициенты модели		
	$a_i (e_{i \max})$	$b_i (\bar{x}_{1/2})$	$c_i (\bar{x}_{1/8})$		$a_i (e_{i \max})$	$b_i (\bar{x}_{1/2})$	$c_i (\bar{x}_{1/8})$
св. член (0)	$-6,36 \cdot 10^{-2}$	$-4,30 \cdot 10^{-2}$	$3,76 \cdot 10^{-2}$	$X_1 \cdot X_3$	$2,16 \cdot 10^1$	$-1,65 \cdot 10^1$	$-2,28 \cdot 10^1$
X_1	$1,52 \cdot 10^{-1}$	$1,72 \cdot 10^{-1}$	$3,74 \cdot 10^{-1}$	$X_1 \cdot X_4$	$7,51 \cdot 10^{-1}$	$-3,53 \cdot 10^{-1}$	$-8,78 \cdot 10^{-1}$
$X_1 \cdot X_1$	игнор.	$-6,99 \cdot 10^2$	$-1,26 \cdot 10^3$	$X_1 \cdot X_5$	игнор.	$1,01 \cdot 10^{-3}$	игнор.
X_2	$-1,33 \cdot 10^{-1}$	$7,38 \cdot 10^{-2}$	$5,87 \cdot 10^{-2}$	$X_1 \cdot X_6$	$-2,40 \cdot 10^1$	-6,41	-2,81
$X_2 \cdot X_2$	$4,18 \cdot 10^{-2}$	$-1,71 \cdot 10^{-2}$	$-1,90 \cdot 10^{-2}$	$X_2 \cdot X_3$	$-2,84 \cdot 10^{-1}$	$-2,66 \cdot 10^{-2}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$
X_3	игнор.	игнор.	$-2,48 \cdot 10^{-1}$	$X_2 \cdot X_4$	$-7,18 \cdot 10^{-3}$	$-1,28 \cdot 10^{-3}$	игнор.
$X_3 \cdot X_3$	7,88	игнор.	$6,01 \cdot 10^{-1}$	$X_2 \cdot X_5$	$4,82 \cdot 10^{-5}$	$-1,20 \cdot 10^{-5}$	$-6,98 \cdot 10^{-5}$
X_4	$9,15 \cdot 10^{-2}$	игнор.	$-1,30 \cdot 10^{-2}$	$X_2 \cdot X_6$	$2,32 \cdot 10^{-1}$	$-3,98 \cdot 10^{-2}$	$-3,60 \cdot 10^{-2}$
$X_4 \cdot X_4$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$9,36 \cdot 10^{-5}$	$7,68 \cdot 10^{-4}$	$X_3 \cdot X_4$	$2,73 \cdot 10^{-1}$	игнор.	$4,33 \cdot 10^{-3}$
X_5	игнор.	игнор.	$-7,61 \cdot 10^{-5}$	$X_3 \cdot X_5$	$-6,81 \cdot 10^{-4}$	игнор.	$6,25 \cdot 10^{-5}$
$X_5 \cdot X_5$	игнор.	игнор.	игнор.	$X_3 \cdot X_6$	-4,38	игнор.	игнор.
X_6	игнор.	$2,29 \cdot 10^{-1}$	$4,02 \cdot 10^{-1}$	$X_4 \cdot X_5$	$-1,65 \cdot 10^{-5}$	игнор.	$2,60 \cdot 10^{-6}$
$X_6 \cdot X_6$	$7,63 \cdot 10^{-1}$	$-1,89 \cdot 10^{-1}$	$-4,68 \cdot 10^{-1}$	$X_4 \cdot X_6$	$-1,37 \cdot 10^{-1}$	$-5,52 \cdot 10^{-3}$	$-1,07 \cdot 10^{-2}$
$X_1 \cdot X_2$	-9,10	2,56	1,01	$X_5 \cdot X_6$	$2,04 \cdot 10^{-4}$	игнор.	$8,63 \cdot 10^{-5}$

В исследуемой области, натяг наибольшее влияние оказывает на величины $\bar{x}_{1/2}$ и $\bar{x}_{1/8}$ при почти неизменном $e_{i \max}$. Чем больше натяг $\bar{\delta}$, тем больше глубина упрочненного слоя. Модуль упрочнения A влияет на величины $\bar{x}_{1/2}$ и $\bar{x}_{1/8}$ – чем больше модуль, тем меньше толщина и больше градиент деформаций при почти неизменном $e_{i \max}$. Коэффициент упрочнения n достаточно сильно влияет на $e_{i \max}$ и на глубину деформированного слоя – при уменьшении n увеличивается $e_{i \max}$, уменьшается глубина деформаций и увеличивается градиент деформаций. Влияние относительного диаметра заготовки неоднозначно.

Для более детального анализа модели (5) на рис. 3 построены графики зависимости изучаемых величин $e_{i \max}$, $grad e_i$, $\bar{x}_{0,002}$ от каждого по отдельности фактора. Легенда номера графика соответствует номеру опыта в центральном композиционном плане. В табл. 3 показаны значения влияющих параметров, использованные при построении графиков. При рассмотрении каждой графической зависимости варьируемый аргумент из таблицы должен быть исключен. Показаны верхние, нижние и некоторые характерные промежуточные области изучаемых функций отклика.

Как показывают расчеты, деформированное состояние заготовки достаточно сильно зависит от свойств материала – кривой течения. На наш взгляд, причиной этому явлению может быть следующее: изменение свойств материала приводит к изменению контактной жесткости,

от которой зависит пластическая волна перед инструментом и длина контакта заготовки и дорна. Изменение геометрии волны и длины контакта, в свою очередь, существенно влияет на деформированное состояние. Чем выше пластическая жесткость материала (понятие близко к твердости) – больше модуль упрочнения и меньше показатель упрочнения тем большие деформации развиваются в материале.

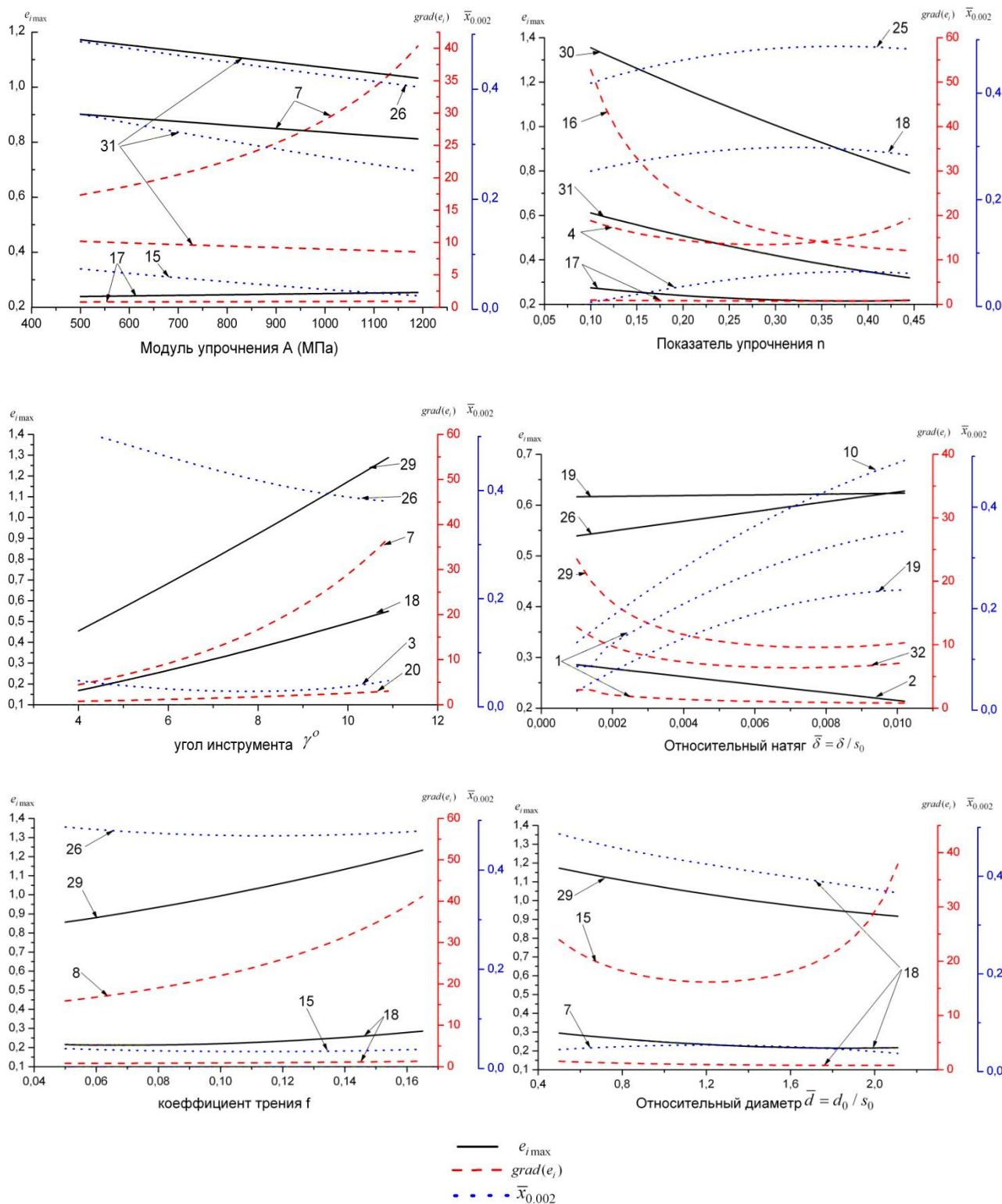


Рис. 3. Влияние основных технологических параметров на параметры упроченного слоя

Таблица 3

Обозначения кривых к рис. 3

№ кривой	$\bar{\delta}$	\bar{d}	f	$\gamma, ^\circ$	$A, \text{МПа}$	n	№ кривой	$\bar{\delta}$	\bar{d}	f	$\gamma, ^\circ$	$A, \text{МПа}$	n
1	0,001	2	0,05	5	500	0,1	18	0,01	2	0,05	5	1500	0,1
2	0,001	2	0,05	5	1500	0,5	19	0,01	2	0,05	10	500	0,1
3	0,001	2	0,05	10	500	0,5	20	0,01	2	0,05	10	1500	0,5
4	0,001	2	0,05	10	1500	0,1	25	0,01	0,5	0,05	5	500	0,1
7	0,001	2	0,15	10	500	0,1	26	0,01	0,5	0,05	5	1500	0,5
8	0,001	2	0,15	10	1500	0,5	29	0,01	0,5	0,15	5	500	0,5
10	0,001	0,5	0,05	5	1500	0,1	30	0,01	0,5	0,15	5	1500	0,1
15	0,001	0,5	0,15	10	500	0,5	31	0,01	0,5	0,15	10	500	0,1
16	0,001	0,5	0,15	10	1500	0,1	32	0,01	0,5	0,15	10	1500	0,5
17	0,01	2	0,05	5	500	0,5							

С целью проверки (см. рис. 2, а) показано распределение накопленной интенсивности деформаций, построенное в соответствии с полученной моделью (5), а также фотографии микроструктуры до (рис 2, б) и после протягивания (рис 2, в, 10 циклов). Материал – арможелезо, $\gamma = 5^\circ$, $\delta = 0,2$ мм, $f \approx 0,1$, $d = 10$ мм, $s_0 = 20$ мм. Как видно из рис. 2, а рассчитанные значения (сплошная линия) достаточно близко расположены к расчетным по МКЭ и к точкам, определенным по методу твердости [10]. Анализ микроструктуры также подтверждает расчетную величину глубины пластически деформированного слоя.

Рассмотрим вариант технологической задачи, при которой необходимо, к примеру, уменьшить максимальную деформацию. Пусть заготовка имеет внутренний диаметр 10 мм, толщину стенки 20 мм, смазка – сульфозфрезол, угол инструмента – 7° , натяг на сторону – 0,1 мм, количество циклов – 1. Таким образом, относительные величины $\bar{\delta} = 0,005$, $\bar{d} = 0,5$, $f \approx 0,1$, $\gamma = 7^\circ$. Для стали 20 – $A = 810$ МПа, $n = 0,2$. Расчет по модели (5) дает значение $e_{i\max} = 0,562$. Изменим угол инструмента на $\gamma = 5^\circ$, тогда $e_{i\max} = 0,373$. Применение более эффективной смазки (например, твердой на основе дисульфида молибдена), дающей $f \approx 0,05$ приведет к снижению наклепа до $e_{i\max} = 0,48$. Одновременное изменение на $\gamma = 5^\circ$ и $f = 0,05$ даст $e_{i\max} = 0,32$, что практически в 2 раза меньше, чем на исходном материале.

Таким образом, для заданного типоразмера изделия и материала варьируемыми параметрами являются коэффициент трения (условия смазки), угол инструмента, натяг. Свойства материала могут быть изменены путем его предварительной термообработки (как правило, отжига). Относительный диаметр может быть только уменьшен путем внешнего бандажирования.

Также может стоять задача увеличения интенсивности наклепа $e_{i\max}$, с целью придания изделию особых прочностных свойств. Такие деформации совместно с многоцикловым деформированием могут быть назначены для достижения предельного упрочнения металла по пластичности, а также для получения наноструктурных образований в поверхностном слое металла, обуславливающих уникальные свойства изделия и благоприятное технологическое наследие. Однако, в этом случае следует привлекать деформационные критерии пластичности [11] для предсказания возможности обработки изделия без браковочных признаков (шелушения поверхности) [1, 3].

ВЫВОДЫ

1. На деформационное упрочнение оказывают 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. В изученной области полученные функции отклика не имеют экстремальных значений, что позволяет достигать максимальных (минимальных) деформаций, глубины распространения пластических деформаций и градиентов при принятых граничных сочетаниях влияющих факторов.

2. Упрочнение на поверхности $e_{i \max}$ увеличивают угол конусности инструмента γ (наиболее сильно влияющий фактор) и коэффициент трения f и уменьшает показатель упрочнения n . Влияние иных факторов неоднозначно. К увеличению градиента деформаций производит уменьшение натяга на сторону $\bar{\delta}$ (наиболее сильно влияющий фактор), увеличение коэффициента трения f и увеличение угла конусности инструмента γ . К увеличению глубины деформированного слоя производит увеличение натяга на сторону $\bar{\delta}$ (наиболее сильно влияющий фактор) и уменьшение модуля упрочнения A . Коэффициент трения практически не влияет на параметр $\bar{x}_{0.002}$.

3. В отличие от ряда процессов обработки металлов давлением деформированное состояние заготовки при протягивании достаточно сильно зависит от свойств материала. Этот факт опровергает для данного процесса гипотезу о кинематическом подобии в следствии зависимости параметров очага деформаций от контактной жесткости. Изменяя состояние металла путем его термообработки можно управлять процессом упрочнения и технологической наследственностью обработанного изделия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг О. А. *Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании* / О. А. Розенберг. – К. : Наук. думка, 1981. – 288 с.
2. *Некоторые особенности формирования параметров качества отверстия при деформирующем протягивании* / В. А. Титов, В. Н. Яворовский, И. Г. Лавренко, О. В. Герасимов – *Технологические системы*, Киев, 2002. – № 5. – С. 31–36.
3. Розенберг О. А. *Технологическая механика деформирующего протягивания* / О. А. Розенберг, Ю. А. Цеханов, С. Е. Шейкин. – Воронеж : Воронежская государственная технологическая академия 2001. – 203 с.
4. Сулима А. М. *Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин* / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
5. Смелянский В. М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием* / В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение, 2002. – 300 с.
6. Яворовский В. Н. *Локальная деформация в поверхностных слоях на границе трубчатое изделие – дорн при деформирующем протягивании* / В. Н. Яворовский, П. А. Корнийченко, А. В. Котеленец – *НТТУ КПИ*. – Киев, 2011. – № 63 – С. 224–229.
7. Зайдес С.А. *Технологическая механика осесимметричного деформирования : монография* / С. А. Зайдес, А. Н. Исаев – Иркутск: ИрГТУ, 2007. – 432 с.
8. Грушко А. В. *Упрочнение поверхностного слоя трубчатой заготовки при деформирующем протягивании* / А. В. Грушко // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26) – С. 85–90.
9. Новик Ф. С. *Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов* / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение; София : Техника, 1980. – 304 с.
10. Дель Г. Д. *Определение напряжений в пластической области по распределению твердости* / Г. Д. Дель – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.
11. Огородников В. А. *Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы)* / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.