

III. СТВОРЕННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРЕСИВНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

УДК 621.774

Нахайчук О.В.

(Вінницький державний аграрний університет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕГО ШЛИЦЕВОГО ПРОФИЛЯ

На основе теории пластичности и феноменологической теории деформируемости металлов без разрушения произведена оценка технологической наследственности процесса получения внутреннего шлицевого профиля методом обжатия на оправке. Изучено влияние термообработки на восстановление пластичности изделия, даны рекомендации по выбору материалов.

According to the theory of plasticity and phenomenological theory of metal deformability without destruction, the appraisal of technological legacy of process of formation an internal nick profile by setting on a core is executed. Influence of thermal processing for the plasticity restoring of the article is studied, recommendations on materials option are given.

Введение

Изучение вопросов оценки технологической наследственности в настоящее время является одним из приоритетных направлений теории и практики обработки металлов давлением. Механический наклёп, обусловленный неравномерным распределением накопленной деформации, неоднородность свойств, деформационная анизотропия могут повысить или понизить прочность детали в тех случаях, когда она не поддаётся термической обработке после холодного пластического деформирования. При проведении операций отжига для снятия внутренних напряжений и улучшения структуры металла размеры зёрен в различных областях отожжённой детали могут быть разными. В областях, где пластическая деформация близкая к критической, может происходить интенсивное увеличение зёрен [1]. Такой металл имеет низкие механические характеристики, поэтому при проектировании технологических процессов необходимо выбирать режимы деформирования, исключая область деформаций, где происходит интенсивный рост зерна.

Постановка задачи

С помощью феноменологической теории деформируемости, в которой накопление повреждений может быть описано тензорными моделями, можно прогнозировать технологическую наследственность материала в виде остаточной пластичности полученного изделия.

Основная часть

Современный этап развития машиностроения характеризуется созданием новых “высоких” технологий, которые отличаются производительностью, низкими энергозатратами, высоким качеством и надёжностью получаемых изделий и другими положительными факторами. Примером таких технологий может быть разработанный в Институте сверхтвёрдых материалов АН Украины технологический процесс формирования внутреннего шлицевого профиля в трубных заготовках методом их обжатия матрицами на профильных оправках (методом “охватывающего” протягивания) [2]. Суть процесса (рис. 1) состоит в том, что трубная заготовка 1 вместе с размещённой внутри с минимальным зазором шлицевой оправкой 2 проталкивается через деформирующую матрицу. После обжатия по всей длине изделия (осуществляется несколько проходов через различные рабочие диаметры матриц) оправка выпрессовывается и получается готовое изделие.

Данным способом формировали прямобочный шлицевый профиль, отвечающий профилю карданного вала рулевого управления автомобиля ГАЗ-3307. Процесс позволяет получать шлицевые втулки повышенной точности без дальнейшей чистовой обработки в серийном и массовом производстве и может быть осуществлён на вертикально-протяжных станках или на гидропрессах. Указанная технология применена также для восстановления шлицевого соединения карданного вала дизель-поезда Д – 2, основой которой является вышеизложенный процесс. Основные характеристики шлицевой втулки: $z = 34$, $m = 2,5$, угол профиля зуба $\alpha_0 = 30^\circ$, $D_f = 90$ мм, материал – Ст 20Х. Данный процесс можно охарактеризовать как высокопроизводительный и металлосберегающий, однако, его широкое внедрение сдерживается отсутствием надёжных расчётных методов, позволяющих определять напряжённо-деформированное состояние на различных стадиях формирования изделия с оценкой степени использования пластичности, применение различных материалов без технологических отказов (разрушений металла, потери устойчивости). Кроме того, необходимо уметь прогнозировать на стадии проектирования технологического процесса ожидаемые физико-механические характеристики изделий.

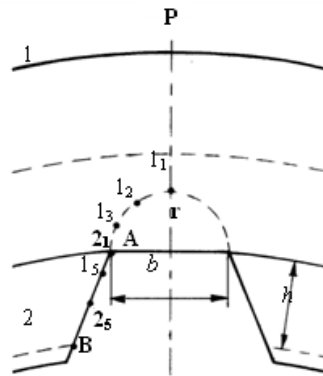


Рис. 1. - Схема формирования внутренних шлицев в трубной заготовке

В данном процессе осевые и радиальные усилия достигают порядка 250 кН, а контактное давление 1 ГПа, что может негативно сказаться на долговечности оборудования и оснастки, поэтому возникла необходимость проведения комплексного исследования данного процесса. В работе [3] представлена методика расчёта напряжённо-деформированного состояния и разработаны подходы к прогнозированию разрушения в области формирования внутреннего шлицевого профиля.

Данная работа посвящена оценке технологической наследственности в плане определения параметров остаточной пластичности, исследования влияния рекристаллизационного отжига на пластичность, изучению и подбору рекомендуемых материалов с целью оптимизации данного процесса.

Из результатов работы [3] следует, что наиболее опасной областью является область контакта АВ - область касания клина шлица оправки и пластической области (рис. 1). В этой области показатели [4]:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3}I_2(D_\sigma)} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u} ; \chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3}I_2(D_\sigma)} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_u} \quad (1)$$

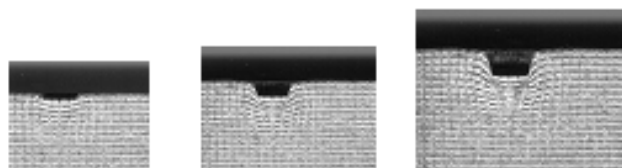


Рис. 2. - Стадии формирования трапецидального профиля

достигают наибольшего (с учётом знака) значения, эта область является наиболее жёсткой. В процессе исследований изучалось перемещение точек опасных областей в физической плоскости посредством моделирования на составных образцах (рис. 2) и в плоскости показателей \bar{e}_u ; η ; χ , компоненты которых рассчитывались на разных стадиях на основании экспериментальных исследований. Рассмотрим перемещение точек 1 и 2 в физической плоскости (рис. 1), где сплошными линиями показаны положения наружной и внутренней поверхностей втулки до деформирования, штриховыми – после прохода через матрицу. Исходным положением т. 1 было расстояние, равное радиусу области наростообразования, которая, по данным Г. А. Смирнова-Аляева, образуется уже при $h \approx 0,1b$; $b = 2r$ [5], эта же область видна на рис. 2.

При перемещении деформированного металла в процессе обжатия точка 1 проходит последовательно точки $1_2 \dots 1_5$, которые ограничивают область наростообразования. Для точки 2 расчёт проводился как для движущейся изначально до конца по сходящемуся каналу. Другими, менее опасными областями были область наростообразования и область, ограничиваемая радиусами $R = r \dots 1,5r$ [3]. В таблице 1 представлены данные для расчёта показателей η и χ и параметров остаточной пластичности для точек 1 и 2. Для исследования остаточной пластичности опасных точек 1 и 2 был использован критерий, учитывающий тензорный характер накопления повреждений [1]:

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u} \left(\frac{1}{2} + \frac{e_u}{e_p} \right) \beta_{ij} \frac{de_u}{e_p}, \quad \beta_{ij} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{d\epsilon_{ij}}{de_u}; \quad (2)$$

Таблица 1

Данные для расчёта показателей η и χ и параметров остаточной пластичности

Данные для точки 1								
h, мм	e_u	$\sigma_u \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_\rho \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_\theta \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_0 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	η	$\tau_{\rho\theta} \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	χ
1,5	0,28	61	0	- 60	- 30,5	- 1,5	9	0,22
1,7	0,32	62	10	- 51	- 20	- 1	7,7	0,366
1,8	0,35	63	12	- 51	- 19	-0,92	7,6	0,374
2,3	0,4	65	16	- 49	- 16	- 0,75	7,3	0,37
2,7	0,45	66	18	- 48	- 15	-0,67	7,1	0,36
Данные для точки 2								
1,5	0,13	55	12	- 43	- 15	- 0,83	7,4	0,373
1,8	0,28	61	16	- 43	- 13,8	- 0,7	6,9	0,35
2	0,33	63	18	- 45	- 13	- 0,63	6,7	0,36
2,4	0,4	65	24	- 41	- 8,5	- 0,4	6,1	0,316
2,7	0,45	66	30	- 36	- 1,3	- 0,13	5,4	0,226

* Расчёт произведён по методике, изложенной в [3].

Для определения относительной остаточной пластичности используем соотношение [6]:

$$\frac{\bar{e}}{e_p} = -\frac{1}{2} - \frac{e_u}{e_p} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{e_u}{e_p} \right)^2 + \sqrt{2 \left[\psi_r - \psi_\phi + \sqrt{(\psi_r - \psi_\phi)^2 + 2(1 - \psi_{ij}\psi_{ij})} \right]}} \quad (3)$$

На рис. 3 представлены результаты расчета параметров анизотропии опасных областей - точек 1 и 2, из которых явствует, что возрастание использованного ресурса пластичности в радиальном направлении и в направлении сдвига для указанных точек

происходит неравномерно, а относительная остаточная пластичность начинает интенсивно убывать при значениях относительной глубины внедрения $\bar{h} \approx 0,6$. Значит, до указанного значения необходимо осуществлять первый переход с соответствующей термообработкой (рекристаллизационный отжиг, промежуточный нагрев [7]).

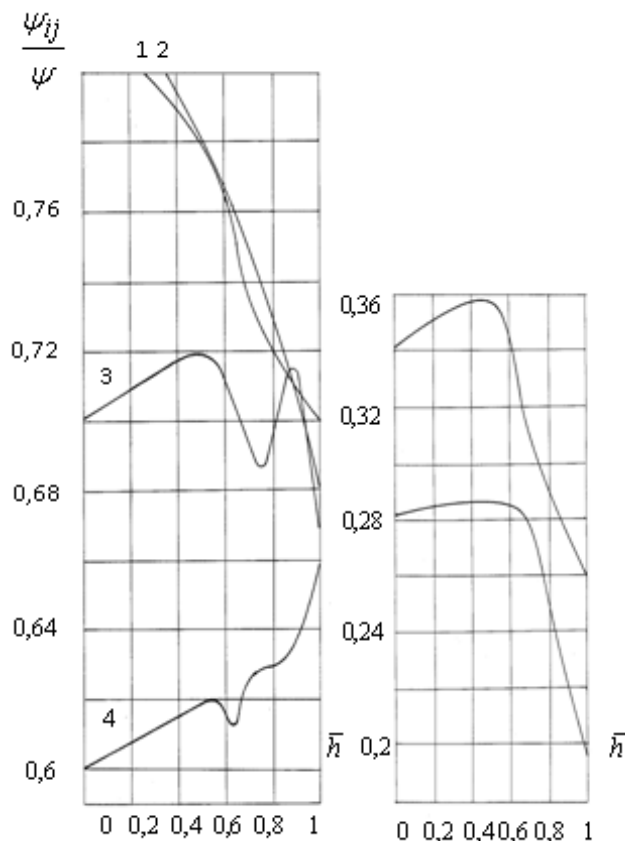
Исследование влияния промежуточных отжигов на восстановление пластичности.

Известно, что при термической обработке металлов отжигом идут процессы его разупрочнения а также восстановление пластических свойств. В основе восстановления пластичности лежат диффузионные процессы переноса вещества в поры и микротрещины и их диффузии к поверхностям. Теория разрушения В. Л. Колмогорова [8] предполагает в физических уравнениях, связывающих напряжённое и деформированное состояние, учитывать разрыхление деформируемого материала по мере накопления степени использования запаса пластичности ψ . Исследования выполняли с одной промежуточной термообработкой. Режим термообработки образцов после деформирования был таким: температура 700°C , выдержка при этой температуре 4 часа и охлаждение вместе с печью. Скорость нагрева не превышала 3 град/мин. Граничную деформацию при сжатии определяли по соотношению:

$$e_p = \ln \frac{h_0}{h_p}, \quad (4)$$

где h_0 - исходная высота образца; h_p - высота образца после разрушения в процессе осадки.

Степень деформации на i – м этапе при сжатии определяли по формуле:



кривые: 1 - $\frac{\bar{e}}{e_p}(1)$; 2 - $\frac{\bar{e}}{e_p}(2)$; 3 - $\frac{\psi_r}{\psi}(2)$; 4 - $\frac{\psi_r}{\psi}(1)$; 5 - $\frac{\psi_{r\theta}}{\psi}(1)$; 6 - $\frac{\psi_{r\theta}}{\psi}(2)$

Рис. 3. - Анизотропия остаточной пластичности изделия

$$e_u = \ln \frac{h_0}{h_i}, \quad (5)$$

где h_i - высота образца после деформации. И использованный ресурс пластичности без отжига определялся по соотношению: $\psi_1 = \frac{e_u}{e_p}$. Степень деформации на i – м этапе при отжиге находили как:

$$e_{u2} = \ln \frac{h_0}{h_{p2}}, \quad (6)$$

где h_{p2} – высота образца после разрушения в процессе осадки на i – м этапе. И использованный ресурс пластичности с применением отжига:

$$\psi_2 = \frac{e_{u2}}{e_p}, \quad (7)$$

тогда величина восстановленного запаса пластичности после отжига $\Delta\psi_1$ [8]:

$$\Delta\psi_1 = \psi_1 + \psi_2 - 1, \quad (8)$$

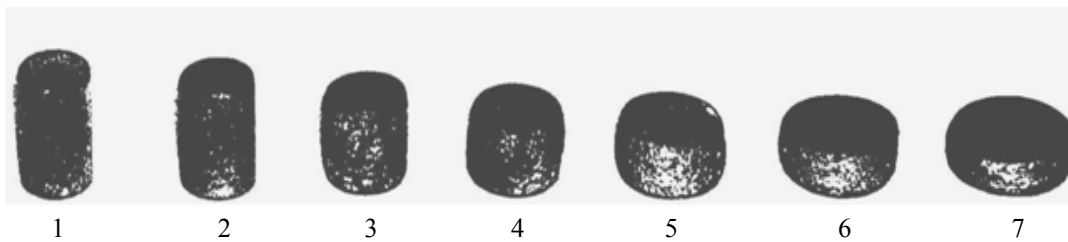


Рис. 4. - Образцы с различной степенью деформации после отжига.

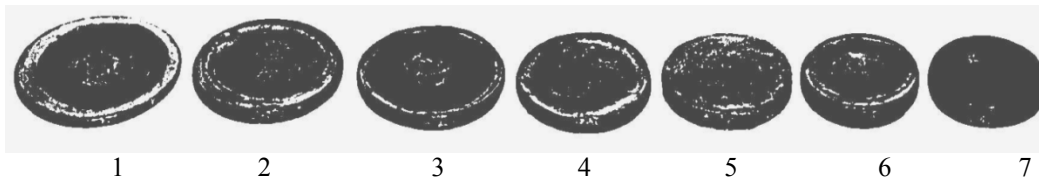


Рис. 5. - Разрушенные образцы для определения e_{u2} на i – м этапе.

На рис. 4 представлены образцы с различной степенью деформации после отжига, 5 – разрушенные образцы для определения e_{u2} на i – м этапе. На рис. 6 приведена зависимость, характеризующая стадии накопления повреждённости при деформации и возможности её уменьшения при последующей термической обработке. Анализ показывает, что дефекты, которые не залечиваются при отжиге, возникают при $\psi \geq 0,2 \dots 0,25$.

Рекомендации по выбору материалов изделий

Материал заготовки должен иметь необходимую для получения заданной формы изделия пластичность и не проявлять при этом большого сопротивления деформированию, с другой стороны, изделие должно обладать высокими эксплуатационными свойствами: износостойкостью, твёрдостью, прочностью, что обуславливает применение термообработки

легированных сталей. На кафедре сопротивления материалов и прикладной механики Винницкого государственного технического университета, возглавляемой д. т. н., проф.

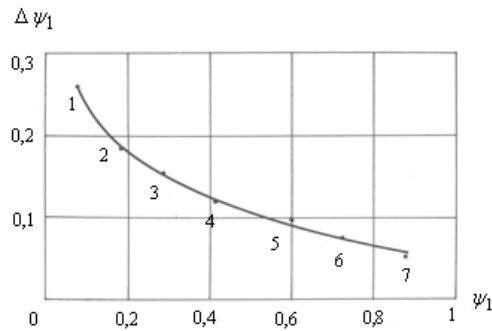


Рис. 6. - Восстановление пластичности при отжиге деформированных образцов.

В. А. Огородниковым накоплен многолетний опыт по оценке свойств материалов с точки зрения их деформируемости при обработке давлением, поэтому ниже приводятся характеристики упрочняемости (табл. 2, рис. 7), и данные для построения диаграммы пластичности. Представлены также коэффициенты чувствительности пластичности материалов к смене показателя напряжённого состояния (λ_1 - в “жесткой области”: $0 \leq \eta \leq 1$; λ_2 - в “мягкой области”: $-1 \leq \eta \leq 0$).

$$\lambda_1 = \ln \frac{e_p(\eta=0)}{e_p(\eta=1)}; \quad \lambda_2 = \ln \frac{e_p(\eta=-1)}{e_p(\eta=0)} \quad (9)$$

Чем больше коэффициент λ , тем круче вид диаграммы пластичности материала, следовательно, выше чувствительность пластичности к изменению η [4]. Материалы, у которых коэффициент λ близок к нулю, обладают пологой диаграммой пластичности, чувствительность пластичности к изменению схемы напряжённого состояния незначительна, следовательно, увеличение пластичности за счёт смягчения схемы напряжённого состояния таких материалов затруднено, т. к. требуются весьма высокие гидростатические давления для существенного повышения пластичности. С другой стороны, рекомендуются материалы, которые традиционно применяются для производства зубчатых венцов, шестерён, гильз и других цементуемых деталей, работающих в условиях износа при трении и к которым предъявляются требования высокой поверхностной твёрдости.

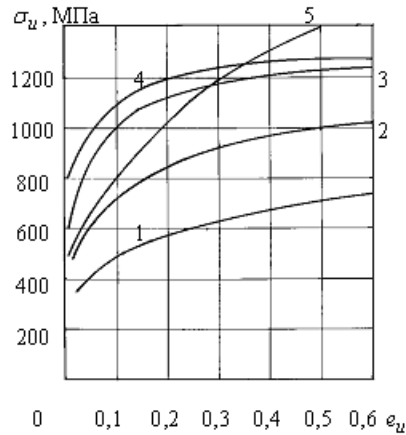
Таблица 2

Коэффициенты функции кривой упрочнения и значения предельных деформаций материалов

Материал сталь	$\sigma_u = Ae_u^n$		Граничная пластичность материалов при сжатии, кручении и растяжении			Коэффициенты чувствительности пластичности материала к изменению показателя напряженного состояния	
	A, МПа	n	$e_p(\eta=-1)$	$e_p(\eta=0)$	$e_p(\eta=1)$	λ_1	λ_2
20X	768	0,186	1,85	0,85	0,33	0,946	0,778
X18H9T	1500	0,351	1,4	1,05	0,78	0,297	0,288
40X	1300	0,095	1,55	0,86	0,6	0,36	0,589
40XH2MA	1440	0,116	1,52	0,76	0,48	0,46	0,693
12X18H9T	1820	0,368	1,6	0,76	0,38	0,693	0,744

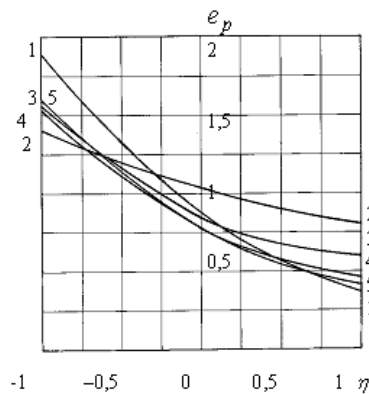
Сравнительная характеристика рекомендуемых материалов.

Согласно рекомендациям А. П. Гуляева [7], для изделий, испытывающих большие напряжения и удары, следует применять хромоникелевые высокопрочные стали. Для изделий сложной конфигурации, для которых деформация при закалке нежелательна (например, шестерни) – легированные стали, закаливаемые в масле. После закалки и низкого отпуска эти стали приобретают очень высокие механические свойства (предел прочности до 130 – 140 МПа), это обуславливает их применение не только в цементованном виде, но и без цементации (для деталей, от которых требуется высокая прочность без высокой износостойкости).



1 - Ст 20Х; 2 - Х18Н9Т; 3 - Ст 40Х; 4 - 40ХН2МА; 5 - 12Х18Н10Т

Рис. 7. - Кривые течения применяемого материала и рекомендуемых материалов



1 - Ст 20Х; 2 - Х18Н9Т; 3 - Ст 40Х; 4 - 40ХН2МА; 5 - 12Х18Н10Т

Рис. 8. - Диаграммы пластичности и рекомендуемых материалов

При термообработке хромоникелевых сталей выявлено, что нижний порог мартенситного превращения (точка M_k) для насыщенного углеродом цементованного слоя будет находиться ниже 0°C . Следовательно, при обычной закалке и низком отпуске в таком слое будет сохраняться большое количество остаточного аустенита, что часто снижает твёрдость слоя ниже допустимого предела (HRC 58-62). Радикальным средством для устранения излишнего количества остаточного аустенита в цементованном слое является обработка холодом [7]: детали после закалки охлаждают до отрицательных температур, что вызывает превращение почти всего аустенита в мартенсит в поверхностном слое и повышение твёрдости. К таким сталям относятся рекомендуемые цементуемые низкоуглеродистые стали Х18Н9Т и 12Х18Н9Т. Стали 40Х и 40ХН2МА являются улучшаемыми (среднеуглеродистыми). Обычная термическая обработка таких сталей – закалка в масле и высокий отпуск. Важной характеристикой сталей является их способность к сквозной

прокаливаемости. Поскольку толщина стенок втулки после пластического деформирования составляет менее 20 мм, то применение, например, стали 40Х (легированной 1% Cr), позволяет получить при охлаждении в масле сквозную прокаливаемость. Легирование другими элементами хромистой стали также повышает прокаливаемость (сталь 40ХН2МА).

С точки зрения оценки деформируемости рекомендуемых сталей по сравнению с применяемой Ст 20Х можно отметить следующее. При показателе напряжённого состояния $\eta = -1$ значения e_p материалов находятся не ниже значения 1,3 (рис. 8). Совмещение путей деформирования опасных областей, приведённых в работе [3] и диаграмм пластичности показывает, что применение данных материалов не окажет существенного влияния на снижение ресурса пластичности даже с учётом влияния третьего инварианта тензора напряжений. Пластичность при $\eta = 0$ у всех материалов примерно одинакова (см. табл. 2), а при $\eta = 1$ значения e_p рекомендуемых материалов являются большими (например, для стали Х18Н9Т на 50 %), что является важным для обеспечения прочности и надёжности получаемых изделий, испытывающих растягивающие напряжения.

Анализ кривых течений (рис. 7) и коэффициентов аппроксимирующих функций показывает, что рекомендуемые материалы имеют более высокие свойства упрочнения с увеличением степени деформации по сравнению со сталью 20Х (например, сталь 40ХН2МА на 40 – 45 %). Поэтому, можно ожидать, что при формировании изделий из рекомендуемых материалов возрастут усилия и нагрузки на инструмент при прочих равных условиях. Следовательно, для каждого конкретного случая необходимо проводить экономические расчёты.

Выводы

Исследование влияния термообработки на восстановление пластичности показало эффективность её проведения после пластического формоизменения изделия. Так, в указанных опасных областях деформирования пластичность практически восстанавливается. Изучение технологической наследственности позволило установить зависимости относительной остаточной пластичности и компонентов тензора повреждений от относительной глубины формируемого профиля, что позволило рекомендовать параметры переходов изучаемого процесса. При разработке рекомендаций по выбору материалов учитывались два основных фактора: с одной стороны – рекомендовались материалы, которые традиционно применяются для производства подобного рода изделий, работающих в условиях износа при трении и к которым предъявляются требования высокой поверхностной твёрдости; с другой стороны, производилась оценка свойств материалов с точки зрения их деформируемости при обработке давлением. Такими материалами являются Х18Н9Т, 40Х, 40ХН2МА, 12Х18Н9Т. Отмечено также, что при их выборе необходимо проводить экономические расчёты.

Литература

1. Дель Г. Д. Технологическая механика. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
2. Розенберг О. А., Траченко Б. П. Формообразования шлицевых отверстий в трубных заготовках методом холодного пластического деформирования // *Технология и организация производства*. - 1991. - № 2. - С. 20-23.
3. Огородников В. А., Нахайчук О. В., Музычук В. И. Приложение теории деформируемости к решению задач механики деформирования внутреннего шлицевого профиля обжатим на оправке. Сборник научных трудов международной НТК "Прогрессивные технологии и оборудование кузнечно-штамповочного производства", МГТУ "МАМИ", Москва, 2003. С 66-75.
4. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.
5. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию, 3 – е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1978.–368 с.
6. Розенберг О. А., Цеханов Ю. А., Шейкин С. Е. Технологическая механика деформирующего протягивания. Воронеж. Гос. Технол. Акад. – Воронеж, 2001. – 203 с.
7. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1977. – 645 с. 8. В. Л. Колмогоров. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1986. 688 с.