

УДК 621.982.44

ПРАВКА МАЛОЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ. ЧАСТЬ 2. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКЕ ПЛОСКИМИ ПЛИТАМИ

Зайдес С.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов (zsa@istu.edu)

Куанг Лэ Хонг, аспирант кафедры машиностроительных технологий и материалов (mybo91@gmail.com)

Иркутский национальный исследовательский технический университет
(664074, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

Аннотация. Для восстановления формы искривленных маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей предложена правка изгибом при воздействии распределенной нагрузки с последующим упрочнением заготовки способом поверхностного пластического деформирования, основанном на поперечной обкатке заготовки плоскими плитами. Известно, что после правки поперечным изгибом формируются неравновесные напряжения по всему объему заготовки и с течением времени форма детали может снова исказиться. Поэтому, после выполнения процесса правки изгибом, необходимо дополнительно упрочнять заготовки способом поверхностного пластического деформирования, основанном на поперечной обкатке заготовки плоскими плитами. Целью работы является определение условия захвата и напряженного состояния заготовки при поперечной обкатке цилиндрических деталей плоскими плитами. В работе использован математический аппарат и программный пакет Ansys Workbench. Новизной работы является новый способ управления напряженным состоянием при правке цилиндрических заготовок. В результате получено значение предельного угла захвата α , находящегося в диапазоне $2 - 8^\circ$ и максимальное значение абсолютного обжатия, зависящее от коэффициента трения и диаметра заготовки. Оптимальное значение абсолютного обжатия находится в диапазоне $\Delta H = 0,07 - 0,15$ мм. Результаты расчетов показали, что после поперечной обкатки в центре поперечного сечения заготовки имеет место напряженное состояние всестороннего растяжения, а в периферийных слоях заготовки формируется напряженное состояние сжатия. Способ упрочнения поперечной обкаткой плоскими плитами исключает образование трещин и разрушение материала в центральной области цилиндрических изделий.

Ключевые слова: правка, угол захвата, абсолютное обжатие, коэффициент трения, поперечная обкатка, остаточные напряжения, напряженное состояние.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-9-674-680

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное стремление к повышению прочности конструкционных материалов позволяет создавать изделия с меньшей материалоемкостью [1 – 28]. В частности, среди деталей машин цилиндрической формы сформировался класс маложестких валов, изготовление которых на современном этапе развития техники и технологи представляет определенные трудности. Одной из таких проблем является обеспечение точности на этапах изготовления или ремонта деталей малой жесткости. Поэтому на всех стадиях технологического процесса при изготовлении нежестких деталей с отношением длины к диаметру более 10, в технологические процессы изготовления и сборки обычно включают несколько операций правки [1].

Способы холодной правки на прессах нашли достаточно широкое распространение в производственной практике. Однако они не всегда подходят, так как при этом сложно обеспечить прецизионную точность обработки и необходимое качество поверхностного слоя [1].

Основной недостаток известных способов правки заключается в формировании остаточных напряжений, которые неравномерно распределяются в объеме детали. Малейшие температурно-силовые изменения приводят к новой схеме уравнивания остаточных напряжений за счет искажения формы детали. Поэтому вопросы стабилизации напряженного состояния за счет выравнивания остаточных напряжений по длине заготовки являются актуальными.

Для решения вышеизложенных проблем авторами разработана новая кинематика процесса правки, позволяющая снижать неравномерность напряженного состояния в деталях машин, а также повышать производительность процесса правки. В качестве перспективного направления рассмотрена правка поперечным изгибом при воздействии распределенной нагрузки с последующим упрочнением заготовки способом поверхностного пластического деформирования (ППД), основанном на поперечной обкатке заготовки плоскими плитами [2].

В технологии обработки металлов давлением успешно применяют метод поперечной прокатки, кото-

рый используют для получения заготовок сложной формы, а также для профилообразования различных метизов [3 – 5]. Широкое применение поперечной прокатки объясняется как ее технологическими достоинствами, так и значительной эффективностью обработки [3]. По сравнению, например, со штамповкой, прокатка обеспечивает повышение производительности в 1,5 – 2 раза, уменьшение расхода металлопроката на 10 – 30 %, повышение точности, сокращение трудоемкости последующих операций, повышение стойкости инструмента (60 – 300 тыс. шт.) и значительное сокращение затрат на его изготовление [4].

Поэтому в качестве перспективного направления можно использовать способ поперечной обкатки как один из видов ППД. При разработке технологии поперечной прокатки были обнаружены в центральной зоне заготовки большие растягивающие напряжения [5], благодаря которым формируется зона с наличием трещин и повреждений. Для оценки возможности появления трещин в центральной области цилиндра при упрочнении поперечной обкаткой, необходимо рассчитать интенсивность остаточного напряжения в центральной области цилиндра. Результаты определения остаточных напряжений в деталях, упрочненных поверхностным пластическим деформированием, изложены в работах [6 – 10], а напряжения в очаге деформации при ППД представлены в исследованиях [7, 12].

В первой части настоящей работы [13] исследован процесс выправления цилиндрических заготовок поперечным изгибом. Во второй части продолжено исследование процесса поперечной обкаткой плоскими плитами. Целью данной работы является определение условия захвата заготовки и напряженного состояния цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами.

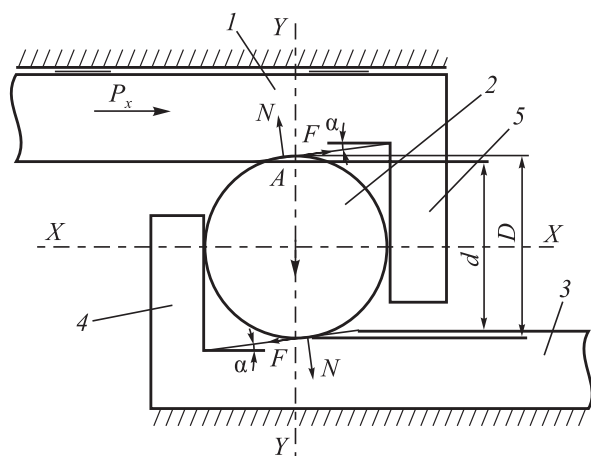


Рис. 1. Схема захвата заготовки плоскими плитами:

1 – подвижная плита; 2 – заготовка; 3 – неподвижная плита; 4 – упоры; 5 – выступ

Fig. 1. Scheme of gripping the billet by flat plates:

1 – movable plate; 2 – billet; 3 – fixed plate; 4 – stops; 5 – protrusion

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЯ ЗАХВАТА ЗАГОТОВКИ ПЛОСКИМИ ПЛИТАМИ

Для осуществления процесса обкатки заготовки плоскими плитами необходимо создать определенные условия. При этом следует отдельно рассматривать условия при неустановившемся процессе обкатки – для начального момента, когда заготовка только подводится к плитам (рис. 1) и при установившемся процессе, когда заготовка уже втянута в плиты (рис. 2).

Рассмотрим схему захвата заготовки плоскими плитами (см. рис. 1). В заходной части главным геометрическим параметром является угол подъема α .

При неустановившемся процессе обкатки в момент соприкосновения заготовки с плитами последние будут оказывать на нее действие в виде сил N , направленных нормально к поверхности валов в точках соприкосновения заготовки с плитами A , и сил трения F , направленных по касательной (см. рис. 1).

Для выявления действия указанных сил N и F на условия захвата заготовки плитами спроектируем их на горизонтальную ось XX (по направлению обкатки) и на вертикальную ось YY .

Для осуществления процесса обкатки (ось XX) горизонтальная сила F_x должно быть больше силы N_x , тогда имеем:

$$F \cos \alpha > N \sin \alpha; \mu N \cos \alpha > N \sin \alpha; \operatorname{tg} \alpha < \mu; \alpha < \operatorname{arctg} \mu, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения между заготовкой и плитами.

Значение коэффициента трения для пары сталь – сталь при холодной обкатке находится в пределах от 0,03 до

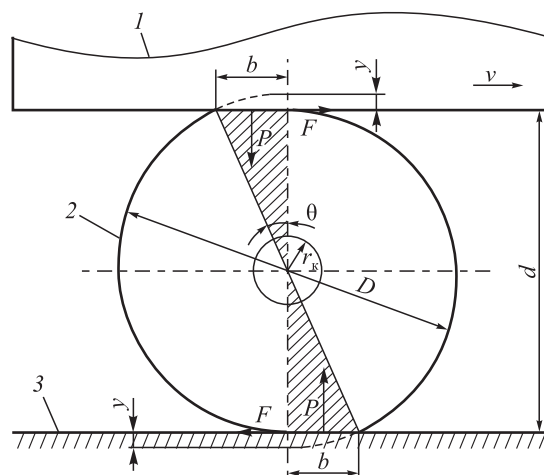


Рис. 2. Схема усилий при поперечной обкатке плоскими плитами:

1 – подвижная плита; 2 – заготовка; 3 – неподвижная плита; r_k – радиус упругого ядра

Fig. 2. Scheme of forces at transverse cheeing by flat plates:

1 – movable plate; 2 – billet; 3 – fixed plate; r_k – radius of the elastic core

0,15 [14 – 17]. По формуле (1) получаем значение угла α , которое находится в диапазоне от 2 до 8°.

Далее рассмотрим схему поперечной обкатки плоскими плитами при установившемся процессе, когда заготовка уже втянута в пространство между плитами [18]. Как видно из рис. 2, направление движения верхней плиты перпендикулярно оси вращения обкатываемого цилиндрического тела. Расстояние между плитами меньше исходного диаметра цилиндра на величину абсолютного обжатия $2y$. К заготовке в направлении центральной оси приложены усилия, которые направлены нормально к контактной площадке. Равнодействующую этих усилий P будем считать приложенной в середине отрезка, соответствующего зоне контакта заготовки с плитами. Нормальные усилия вызывают появление на площадке контакта заготовки с плитами сил трения, равнодействующую которых обозначим через F . Силы трения F приложены в тех же точках, что и нормальные усилия P , и направлены по касательным к площадке контакта.

В работе [2] показано, что для осуществления процесса обкатки, когда заготовка уже втянута плитами, максимальное значение абсолютного обжатия ΔH рассчитывается по формуле

$$\Delta H = D - d - 2y = \frac{2\mu^2 D}{2\mu^2 + 1}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения; D – диаметр заготовки.

Таким образом, получено значение предельного угла захвата α , находящегося в диапазоне 2 – 8°. Максимальное значение абсолютного обжатия зависит от коэффициента трения и диаметра заготовки. Для определения его оптимального значения выполним моделирование процесса правки поперечной обкаткой плоскими плитами.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКОЙ ПЛОСКИМИ ПЛИТАМИ

Для определения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в выправленных деталях построена конечно-элементная модель в виде цилиндра и двух плит в программе Ansys Workbench. Приняты следующие параметры моделирования: цилиндр диаметром 10 мм, длиной 200 мм с максимальным прогибом 0,5 мм, изготовленный из стали Ст45 (предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа); рабочие плиты размером $5 \times 210 \times 210$ мм считаются абсолютно жесткими.

Параметры моделирования:

– конечно-элементная форма – гексаэдр, сгущение 7030 элемента, 30 620 узлов;

– коэффициент трения между заготовкой и плитами $\mu = 0,15$;

– граничные условия: жесткое фиксирование нижней плиты;

– по формуле (2), для заготовки диаметром $D = 10$ мм, максимальное значение абсолютного обжатия $\Delta H = 0,43$ мм.

Зависимость между исходным $f_{исх}$ и общим $f_{общ}$ прогибом можно представить в виде:

$$f_{общ} = \xi f_{исх},$$

где ξ – коэффициент изгиба.

Точное определение коэффициента изгиба для линейно упрочняющегося тела (например, круглого бруса, трубы и стального листа) крайне сложно [19 – 24]. Поэтому решим эту задачу с помощью программного пакета Ansys Workbench.

По результатам, изложенным в работе [13], получены предельные значения коэффициента изгиба от 5,3 до 5,5 для всех случаев жесткости вала при правке поперечным изгибом. Поэтому для выправления цилиндра с исходным прогибом 0,5 мм, общий прогиб будет равен 2,65 мм.

Режимы обработки: верхняя плита после касания с заготовкой перемещается вправо на 2,65 мм (на величину общего прогиба), далее происходит перемещение плиты в первоначальное положение и выправление заготовки. В работе использованы абсолютные обжатия величиной ΔH , равные: 0,05; 0,07; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4 мм. Верхняя плита перемещается влево на 62,83 мм (заготовка поворачивается на 1 оборот) и перемещается вверх на 1 мм (разгрузка).

ДИНАМИКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРАВКИ

Интенсивность рабочих напряжений, возникающих в очаге деформации в процессе правки поперечной обкаткой плоскими плитами, показана на рис. 3 (при $\Delta H = 0,15$ мм). Процесс правки цилиндра поперечной обкаткой плоскими плитами можно разделить на пять этапов (рис. 3): А – правка поперечным изгибом; Б – разгрузка после правки изгибом; В – поперечное сжатие цилиндра; Г – поперечная обкатка за один оборот цилиндра; Д – разгрузка после поперечной обкатки.

При правке цилиндра поперечным изгибом рабочие напряжения монотонно увеличиваются до 380 МПа, достигая предела текучести, и вызывают пластическую деформацию. Затем происходит разгрузка, интенсивность остаточных напряжений составляет 200 МПа. Далее при поперечном сжатии цилиндра рабочие напряжения возрастают до 435 МПа. На этапе поперечной обкатки рабочие напряжения остаются постоянными, равными примерно 440 – 445 МПа. При окончательной разгрузке рабочие напряжения монотонно уменьшаются до уровня интенсивности остаточных напряжений,

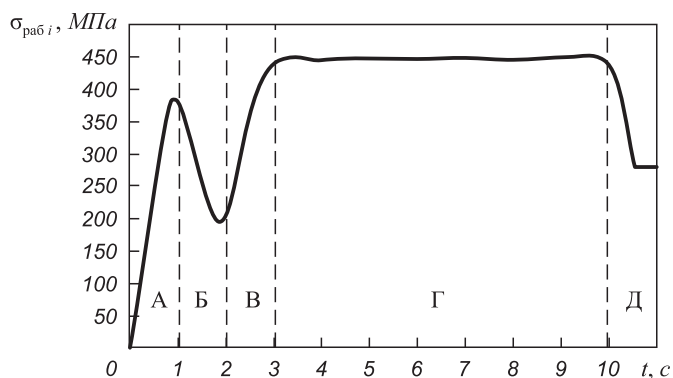


Рис. 3. Изменение интенсивности рабочих напряжений в процессе правки поперечной обкаткой плоскими плитами

Fig. 3. Change in intensity of the working stresses during straightening by transverse cheeing with flat plates

которые остаются в готовых деталях и составляют 279 МПа.

Зависимость интенсивности рабочих напряжений, возникающих при поперечной обкатке, от величины абсолютного обжатия ΔH показана на рис. 4.

В очаге деформации интенсивность рабочих напряжений интенсивно увеличивается при увеличении ΔH до 0,07 мм, достигая значения 410 МПа, а затем незначительно повышается при увеличении ΔH до 0,25 мм. При значении ΔH меньше 0,05 мм рабочие напряжения оказываются меньше предела текучести σ_T (360 МПа) и поэтому в данном случае ожидается только упругая деформация. При значении ΔH больше 0,25 мм, рабочие напряжения оказываются больше предела прочности σ_B (600 МПа) и поэтому при таких режимах обработки возможно разрушение материала.

На рис. 5 показаны некоторые результаты распределения интенсивности остаточных напряжений при раз-

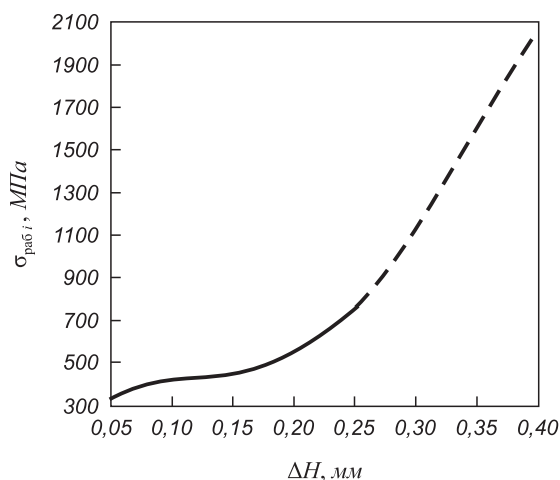


Рис. 4. Зависимость интенсивности рабочих напряжений от абсолютного обжатия

Fig. 4. Dependence of intensity of the working stresses on absolute compression

личных значениях абсолютных обжатий после правки поперечной обкаткой плоскими плитами.

Из рис. 5 видно, что при значении абсолютного обжатия меньше 0,05 мм, получаем неравномерную интенсивность остаточных напряжений после правки (рис. 5, а). При значении абсолютного обжатия, находящегося в диапазоне 0,07 – 0,20 мм, получено равномерное распределение напряжений. При значении обжатия больше 0,25 мм на поверхности заготовки происходит разрушение материала (рис. 5, е, ж, з). На рис. 5, д показано, что после правки интенсивность остаточных напряжений распределена равномерно, но максимальное значение превышает предел текучести материала, поэтому возможно разрушение материала. Таким образом, оптимальное значение абсолютного обжатия находится в диапазоне $\Delta H = 0,07 - 0,15$ мм.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСЛЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКИ ПЛОСКИМИ ПЛИТАМИ

Остаточные напряжения после обкатки цилиндрической заготовки рассчитаны аналитически с использованием законов деформирования упругопластического тела.

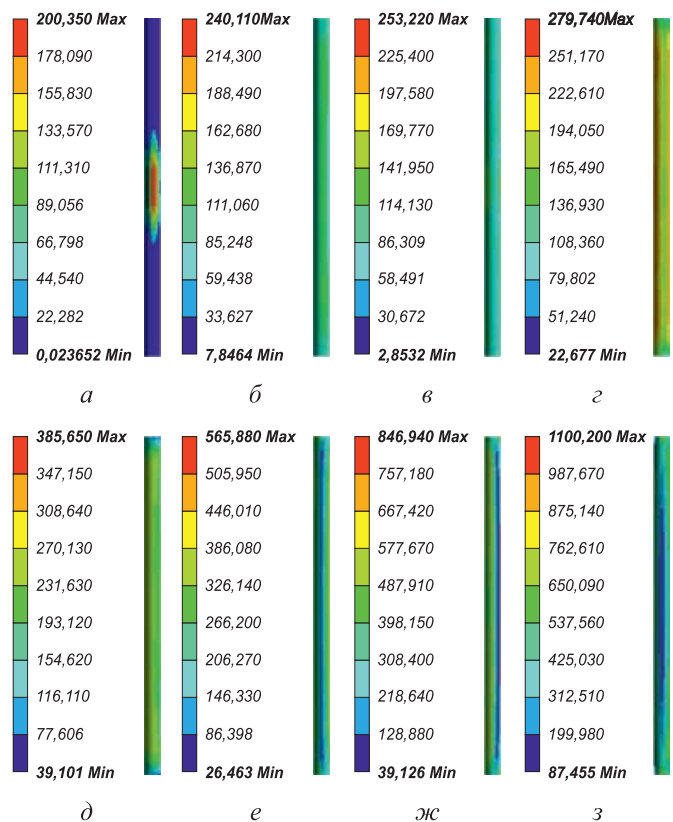


Рис. 5. Распределение интенсивности остаточных напряжений после правки поперечной обкаткой плоскими плитами при ΔH , мм: а – 0,05; б – 0,07; в – 0,1; г – 0,15; д – 0,2; е – 0,25; ж – 0,3; з – 0,4

Fig. 5. Intensity distribution of residual stresses after straightening by transverse cheeing with flat plates ΔH , mm: а – 0.05; б – 0.07; в – 0.1; г – 0.15; д – 0.2; е – 0.25; ж – 0.3; з – 0.4

Главные компоненты тензора остаточных напряжений в пластическом слое цилиндрического тела ($r_k < \rho \leq r$) можно рассчитать по формулам [18]:

$$\frac{\sigma_\rho}{K} = \frac{2 \ln \frac{r}{\rho} - \left[\left(\frac{r_k}{\rho} \right)^2 - \left(\frac{r_k}{r} \right)^2 \right]}{2 \left[1 - \left(\frac{r_k}{r} \right)^2 \right]},$$

$$\frac{\sigma_\theta}{K} = \frac{2 \ln \frac{r}{\rho} - \left[2 - \left(\frac{r_k}{\rho} \right)^2 - \left(\frac{r_k}{r} \right)^2 \right]}{2 \left[1 - \left(\frac{r_k}{r} \right)^2 \right]},$$

$$\frac{\sigma_z}{K} = \eta \left[\frac{\ln \frac{r}{\rho}}{1 - \left(\frac{r_k}{r} \right)^2} - 1 \right],$$
(3)

где $K = \frac{2\sigma_T}{\sqrt{3}}$ для случая энергетической теории предельного состояния; σ_T – предел текучести; $\sigma_z, \sigma_\rho, \sigma_\theta$ – соответственно осевые, радиальные и тангенциальные остаточные напряжения; r – радиус пластически деформируемой зоны; r_k – радиус упругого ядра; η – коэффициент Пуассона.

Остаточные напряжения в упругом ядре ($0 \leq \rho \leq r_k$) цилиндрического тела определяются по формулам [18]:

$$\frac{\sigma_\rho}{K} = \frac{\sigma_\theta}{K} = \frac{\ln \frac{r}{r_k}}{1 - \left(\frac{r_k}{r} \right)^2} - \frac{1}{2}; \quad \frac{\sigma_z}{K} = \eta \left[\frac{2 \ln \frac{r}{r_k}}{1 - \left(\frac{r_k}{r} \right)^2} - 1 \right].$$
(4)

С помощью программы Ansys Workbench получены результаты расчетов остаточных напряжений после поперечной обкатки при величине абсолютного обжатия $\Delta H = 0,15$ мм (рис. 6). В результате расчетов установлено, что после поперечной обкатки плоскими плитами формируются равновесные остаточные напряжения как по длине, так и по поперечному сечению заготовки.

Из рис. 6 следует, что в центре поперечного сечения заготовки остаточные напряжения являются растягивающими. Наружные слои заготовки деформируются по толщине в большей мере, чем внутренние. За счет уменьшения толщины периметр наружных слоев стремится возрасти и, следовательно, они испытывают стремление к отрыву от сердцевины вала. Поэтому возникают растягивающие радиальные напряжения, максимальные в центре и равные нулю на периферии.

Для оценки опасности появления трещин в центральной области цилиндра при упрочнении поперечной обкаткой рассчитана интенсивность остаточного напря-

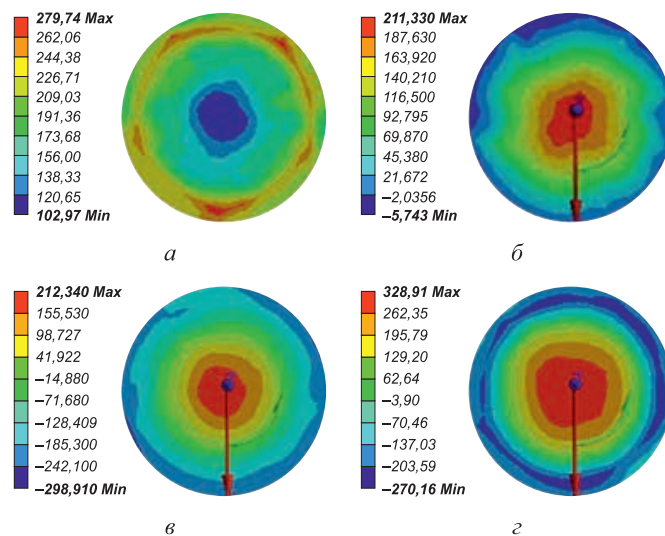


Рис. 6. Поля распределения остаточных напряжений по сечению заготовки после поперечной обкатки плоскими плитами: а – интенсивность остаточных напряжений; б – радиальные остаточные напряжения; в – тангенциальные остаточные напряжения; з – осевые остаточные напряжения

Fig. 6. Fields of residual stresses distribution over the billet’s cross section after transverse cheising with flat plates: а – residual stresses intensity; б – radial residual stresses; в – tangential residual stresses; з – axial residual stresses

жения в центральной области цилиндра по формуле Губера-Мизеса [25 – 27]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_\rho - \sigma_z)^2}.$$
(5)

По формулам (3), (4) и (5) интенсивность остаточных напряжений в центральной области цилиндра равна нулю (при коэффициенте Пуассона $\eta = 0,5$) или весьма мала (рис. 6, а), меньше, чем предел текучести материала ($\sigma_i = 102,97 = 0,29\sigma_T$) при коэффициенте Пуассона $\eta = 0,3$. Таким образом, способ упрочнения поперечной обкаткой плоскими плитами исключает образование трещин и разрушение материала в центральной области цилиндрических изделий.

Выводы

Предложена схема правки маложестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами. Получено значение предельного угла захвата α , находящегося в диапазоне $2 - 8^\circ$. Максимальное значение абсолютного обжатия зависит от коэффициента трения и диаметра заготовки, оптимальные значения абсолютных обжатий находятся в диапазоне $\Delta H = 0,07 - 0,15$ мм.

С помощью программного пакета Ansys Workbench определено напряженное состояние при правке поперечной обкаткой плоскими плитами. Результаты расчетов показали, что после поперечной обкатки в центре

поперечного сечения заготовки имеет место напряженное состояние всестороннего растяжения, а в поверхностных слоях заготовки формируется напряженное состояние сжатия.

В результате упрочнения поперечной обкаткой плоскими плитами, интенсивность остаточных напряжений в центральной области цилиндра весьма мала, меньше, чем предел текучести материала. Это исключает образование трещин и разрушение материала в центральной области цилиндрических изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Avent R.R., Mukai D.J., Robinson P.F. Heat Straightening Rolled Shapes // *Journal of Structural Engineering*. 2000. Vol. 126. No. 7. P. 755 – 763.
2. Зайдес С.А., Куанг Л.Х. Аналитический расчет основных параметров процесса правки маложестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами // *Вестник ИрГТУ*. 2018. Т. 22. № 3. С. 24 – 34.
3. Шукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. – Минск: Наука и техника, 1986. – 223 с.
4. Клушин В.А., Рудович А.О. Технология и оборудование поперечно-клиновой прокатки. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2010. – 300 с.
5. Томленов А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением. – М.: Машгиз, 1963. – 235 с.
6. Zaides S.A., Ninh N.V. Influence of oscillatory smoothing on the residual stress in cylindrical components // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38. No. 11. P. 859 – 864.
7. Sobolevski E.G. Residual stress analysis of components with real geometries using the incremental hole-drilling technique and a differential evaluation method: Dr. diss. – Kassel: Kassel university press GmbH, 2007. – 202 p.
8. Zaides S.A., Fong F.D. Roughness of cylindrical parts in transverse burnishing by flat plates // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38. No. 12. P. 921 – 925.
9. Walton H.W. Deflection methods to estimate residual stress. Handbook of residual stress and deformation of steel // *ASM International*. 2002. P. 89 – 98.
10. Мрочек Ж.А., Макаревич С.С., Кожуро Л.М. и др. Остаточные напряжения. – Минск: УПТехнопринт, 2003. – 352 с.
11. Sjogren S. Choosing the right wire straightener for specific applications // *Euro Wire*. November 2001.
12. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
13. Зайдес С.А., Куанг Л.Х. Правка маложестких цилиндрических деталей. Часть 1. Обоснование вида нагружения и режимов при поперечной правке цилиндрических деталей // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 7. С. 517 – 524.
14. Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
15. Мураткин Г.В., Котова И.В. Математическая модель процесса правки деталей методом поверхностного пластического деформирования с предварительным изгибом заготовки // *Металлообработка*. 2004. № 6. С. 27 – 31.
16. Королев А.В., Балаев А.Ф., Савран С.А. Математическая модель вибромеханической стабилизации геометрических параметров длинномерных деталей // *Успехи современной науки*. 2016. Т. 2. № 7. С. 73 – 77.
17. Dong J., Epp J., Rocha A.S. etc. Investigation of the influence factors on distortion in induction-hardened steel shafts manufactured from cold-drawn rod // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. Vol. 47. No. 2. P. 877 – 888.
18. Куанг Л.Х., Зайдес С.А. Аналитическое определение напряженного состояния цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами // *Вестник ИрГТУ*. 2018. Т. 22. № 9. С. 50 – 66.
19. Shinkin V.N. Calculation of technological parameters of O-forming press for manufacture of large-diameter steel pipes // *CIS Iron and Steel Review*. 2017. Vol. 13. P. 33 – 37.
20. Baier W., Zuset A. Straightening technology and machine. – Germany, 2001.
21. Buchanan D.J., John R. Relaxation of shot-peened residual stresses under creep loading // *Scripta Materialia*. 2008. No. 3. P. 286 – 289.
22. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Message 2. Forces and moments // *CIS Iron and Steel Review*. 2016. Vol. 12. P. 40 – 44.
23. Witels A. The Straightening System: an Indispensable Process for the Production of Wire Materials. – Germany: Albert Witels, January, 2003.
24. Shinkin V.N. Springback coefficient of the main pipelines' steel large-diameter pipes under elastoplastic bending // *CIS Iron and Steel Review*. 2017. Vol. 14. P. 28 – 33.
25. Jahromi B.H., Naye-Hashemi H., Vaziri A. Elasto-plastic stresses in a functionally graded rotating disk // *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*. 2012. Vol. 134. No. 2. P. 021004 1 – 11.
26. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: Компьютер-Пресс, 2002. – 224 с.
27. Chen X., Liu Y. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. – CRC Press, 2014. – 411 p.

Поступила в редакцию 1 февраля 2019 г.

После доработки 4 июня 2019 г.

Принята к публикации 20 июня 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 9, pp. 674–680.

STRAIGHTENING OF LOW-RIGID CYLINDRICAL DETAILS. PART 2. STRESSED STATE OF CYLINDRICAL BILLETS AT TRANSVERSE CHEESING BY FLAT PLATES

S.A. Zaides, Kuang Le Khong

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. To restore the shape of curved low-rigid cylindrical details such as shafts and axles, bending straightening under distributed loading is proposed, followed by hardening of the billet using surface plastic deformation based on transverse cheesing of it by flat plates. It is known that after straightening by transverse bending, non-equilibrium

stresses are formed over the entire volume of the billet and over time the shape of the detail may again be distorted. Therefore, after performing the straightening process by bending, it is necessary to additionally strengthen the billets by surface plastic deformation based on the transverse cheesing of them by flat plates. The aim of the work was to determine the condition of capture and stress state of the billet during such transverse cheesing. We used the mathematical apparatus and software package Ansys Workbench. The novelty of the work is a new way to manage the stress state when straightening cylindrical

billets. As a result, the value of the capture limiting angle α is in the range of 2 – 8°. Maximum value of the absolute reduction depends on friction coefficient and diameter of the billet. Optimal value of the absolute compression is in the range of $\Delta H = 0.07 - 0.15$ mm. The calculation results have shown that after transverse cheeing, in the center of the billet's cross section there is a stress state of all-round tension, and a stress state of compression is formed in the billet's shell. The method of hardening by transverse cheeing with flat plates eliminates the cracks formation and material destruction in the central part of cylindrical products.

Keywords: straightening, angle of capture, absolute compression, friction coefficient, transverse cheeing, residual stresses, stress state.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-9-674-680

REFERENCES

1. Avent R.R., Mukai D.J., Robinson P.F. Heat straightening rolled shapes. *Journal of Structural Engineering*. 2000, vol. 126, no. 7, pp. 755–763.
2. Zaides S.A., Kuang L.Kh. Analytical calculation of the main parameters of small low-rigid cylindrical parts straightening by transverse cheeing with flat plates. *Vestnik IrGTU*. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 24–34. (In Russ.).
3. Shchukin V.Ya. *Osnovy poperechno-klinovoi prokatki* [Fundamentals of cross-wedge rolling]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1986, 223 p. (In Russ.).
4. Klushin V.A., Rudovich A.O. *Tekhnologiya i oborudovanie poperechno-klinovoi prokatki* [Technology and equipment of cross-wedge rolling]. Minsk: FTI NAN Belarusi, 2010, 300 p. (In Russ.).
5. Tomlenov A.D. *Mekhanika protsessov obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal forming processes]. Moscow: Mashgiz, 1963, 235 p. (In Russ.).
6. Zaides S.A., Hinh N.V. Influence of oscillatory smoothing on the residual stress in cylindrical components. *Russian Engineering Research*. 2018, vol. 38, no. 11, pp. 859–864.
7. Sobolevski E.G. *Residual stress analysis of components with real geometries using the incremental hole-drilling technique and a differential evaluation method: Dr. diss.* Kassel: Kassel university press GmbH, 2007, 202 p.
8. Zaides S.A., Fong F.D. Roughness of cylindrical parts in transverse burnishing by flat plates. *Russian Engineering Research*. 2018, vol. 38, no. 12, pp. 921–925.
9. Walton H.W. Deflection methods to estimate residual stress. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. ASM International, 2002, pp. 89–98.
10. Mrochek Zh.A., Makarevich S.S., Kozhuro L.M., Pashkevich M.F., Il'yushenko A.F. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Minsk: UP Tekhnoprint, 2003, 352 p. (In Russ.).
11. Sjogren S. Choosing the right wire straightener for specific applications. *Euro Wire*. November 2001.
12. Blyumenshtein V.Yu., Smelyanskii V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detalei mashin* [Mechanics of technological inheritance at processing and operation of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 400 p. (In Russ.).
13. Zaides S.A., Quang L.H. Straightening of low-rigid cylindrical details. Part I. Justification of the type of loading and modes at transverse straightening. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 7, pp. 517–524. (In Russ.).
14. Grudev A.P. *Vneshnee trenie pri prokatke* [External friction during rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 288 p. (In Russ.).
15. Muratkin G.V., Kotova I.V. Mathematical model of the process of details correction by the method of surface plastic deformation with the preliminary bending of the billet. *Metallrobootka*. 2004, no. 6, pp. 27–31. (In Russ.).
16. Korolev A.V., Balaev A.F., Savran S.A. Mathematical model of vibromechanical stabilization of geometrical parameters of lengthy details. *Uspekhi sovremennoi nauki*. 2016, vol. 2, no. 7, pp. 73–77. (In Russ.).
17. Dong J., Epp J., Rocha A.S., Nunes R.M., Zoch H.W. Investigation of the influence factors on distortion in induction-hardened steel shafts manufactured from cold-drawn rod. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016, vol. 47, no. 2, pp. 877–888.
18. Quang L.H., Zaides S.A. Analytical determination of stressed state of the cylindrical details at transverse cheeing by flat plates. *Vestnik IrGTU*. 2018, vol. 22, no. 9, pp. 50–66. (In Russ.).
19. Shinkin V.N. Calculation of technological parameters of O-forming press for manufacture of large-diameter steel pipes. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 13, pp. 33–37.
20. Baier W., Zusset A. *Straightening technology and machine*. Germany, 2001.
21. Buchanan D. J., John R. Relaxation of shot-peened residual stresses under creep loading. *Scripta Materialia*. 2008, no. 3, pp. 286–289.
22. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Message 2. Forces and moments. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 12, pp. 40–44.
23. Witels A. *The Straightening System: an Indispensable Process for the Production of Wire Materials*. Germany: Albert Witels, January, 2003.
24. Shinkin V.N. Springback coefficient of the main pipelines' steel large-diameter pipes under elastoplastic bending. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 14, pp. 28–33.
25. Jahromi B.H., Nayeb-Hashemi H., Vaziri A. Elasto-plastic stresses in a functionally graded rotating disk. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*. 2012, vol. 134, no. 2, pp. 021004 1–11.
26. Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in examples and tasks]. Moscow: Komp'yuterPress, 2002, 224 p. (In Russ.).
27. Chen X., Liu Y. *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press, 2014, 411 p.

Information about the authors:

S.A. Zaides, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Engineering Technology and Materials” (zsa@istu.edu)

Kuang Le Khong, Postgraduate of the Chair “Engineering Technology and Materials”

Received February 1, 2019

Revised June 4, 2019

Accepted June 20, 2019