

УДК 621.774.353

В. А. ТОМИЛО, В. В. ЛЕВКОВИЧ

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ПРИ ВАЛКОВОМ ОБЖИМЕ УЧАСТКОВ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ**

Физико-технический институт НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 10.07.2014)

Технология валкового обжима концевых участков толстостенных труб основана на поперечно-винтовой прокатке (ПВП). Первоначальные попытки определения напряженно-деформированного состояния (НДС) связаны с большим количеством упрощений. Широко известен метод линий скольжения (линий Чернова–Людерса), при котором дуга касания металла с валком заменялась на прямую линию, а процесс ПВП рассматривался как интегральный результат элементарных процессов ковки с кантовкой на малый угол [1]. При этом прокатка в двухвалковом стане рассматривалась как ковка между плоскими бойками, а в трехвалковом стане – как ковка с применением нижнего вырезного бойка. Метод верхних оценок предполагает замену действительного поля линий скольжения более простым кинематически возможным полем, состоящим из отдельных жестких блоков [2].

Оба этих метода характеризуются следующими допущениями: объемная деформация заменяется плоской деформацией, инструмент принимается абсолютно жестким, обрабатываемый металл – однородным, изотропным, абсолютно жестким в упругом состоянии и абсолютно пластичным в пластическом состоянии.

Поляризационно-оптический метод исследования НДС на прозрачных моделях основан на свойстве некоторых прозрачных изотропных материалов при деформации становиться оптически анизотропными. Применительно к трехмерным деталям данный метод является трудоемким [3]. В настоящей статье для исследования НДС используется метод конечных элементов.

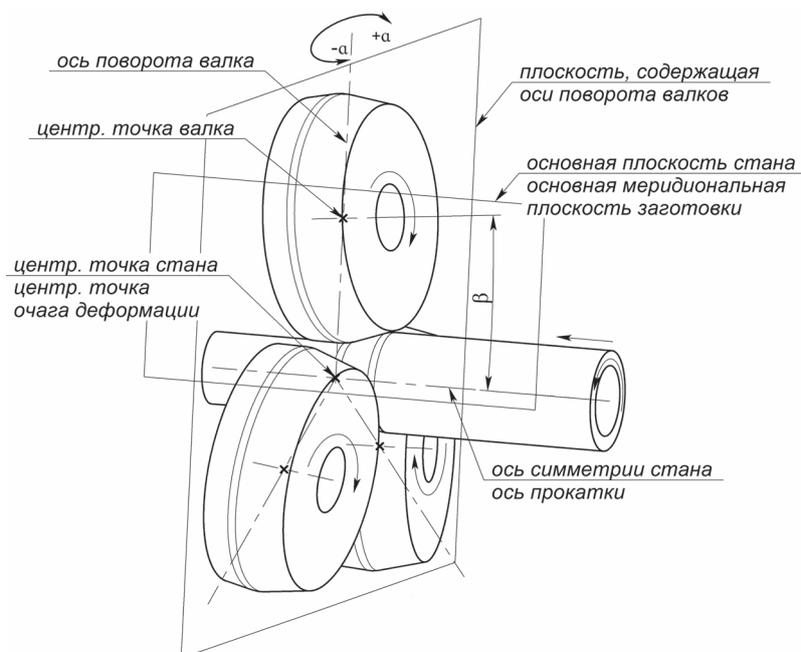


Рис. 1. Схема ПВП

Схема ПВП представлена на рис. 1, где также приведены геометрические элементы, определяющие тип стана. Угол раскатки β определяется при угле подачи α , равном нулю. Ось симметрии стана представляет собой линию, удаленную от осей валков на одинаковое расстояние. В данном случае она совпадает с осью прокатки (ось заготовки). Ось поворота валка – прямая линия, вокруг которой осуществляется поворот валка на угол подачи. Центральная точка валка – точка, в которой пересекаются ось валка и плоскость, содержащая оси поворота валков.

Основная плоскость стана – плоскость, содержащая ось симметрии стана и центральную точку валка. Основная меридиональная плоскость обрабатываемого тела проходит через ось заготовки и параллельна основной плоскости стана или совпадает с ней. В трехвалковом стане имеются три основные плоскости и три основные меридиональные плоскости. Центральная точка стана (очага деформации) – точка пересечения оси симметрии (прокатки) с плоскостью, содержащей оси поворота валков.

Исходный материал для моделирования процесса трехвалковой ПВП методом конечных элементов – трубная заготовка с внешним диаметром 121 мм, толщиной стенки 18 мм, длиной 300 мм. Ее эскиз с обжатым концом представлен на рис. 2.

Валки приняты абсолютно жесткими и равномерно зафиксированы вокруг оси прокатки (рис. 1). Наклон осей валков на угол α способствует перемещению заготовки вдоль оси прокатки при вращении валков. При расчетах учтен теплообмен заготовки с валками и окружающей средой. Материал заготовки – сталь 40X, температура обработки 1250 °С. На рис. 3 приведены зависимости напряжения текучести выбранного материала, учитывающие степень и скорость деформации, а также температуру протекания процесса.

Скорость вращения валков 20 об/мин, максимальный диаметр валков 300 мм, угол наклона образующей конуса входного участка валка по отношению к оси валка составляет 12,76° при $\alpha = 5^\circ$ и $\beta = 6^\circ$. Коэффициент трения принят постоянным по всей поверхности контакта и равным 0,7 (по закону трения Кулона).

В данной работе определены радиальные, тангенциальные и осевые нормальные напряжения. Радиальное и тангенциальное направления указаны на рис. 4, где b – длина дуги контакта, ψ – угол меридионального сечения заготовки (угол между основной меридиональной плоскостью заготовки и меридиональной плоскостью, в которой лежит рассматриваемая точка).

Согласно теоретическим данным, проекции векторов сил трения на ось прокатки во всех точках очага деформации имеют направление, противоположное направлению перемещения металла. Следовательно, в осевом направлении по всему очагу деформации наблюдается только отставание металла. Проекции векторов сил трения на плоскость, перпендикулярную оси прокатки, направлены против вращения заготовки по всей длине очага деформации, за исключением небольшого участка в его начале [4]. Следовательно, в тангенциальном направлении на данном участке присутствуют зоны отставания и опережения, на оставшейся длине очага деформации наблюдается только отставание металла (коэффициент тангенциальной скорости η_t , равный отношению скорости выхода заготовки из валков к линейной скорости на бочке валка, согласно экспериментальным данным, находится в пределах 0,9–0,95). На рис. 5 приведена схема расположения зон отставания и опережения металла в начале очага деформации (T – сила трения, N –

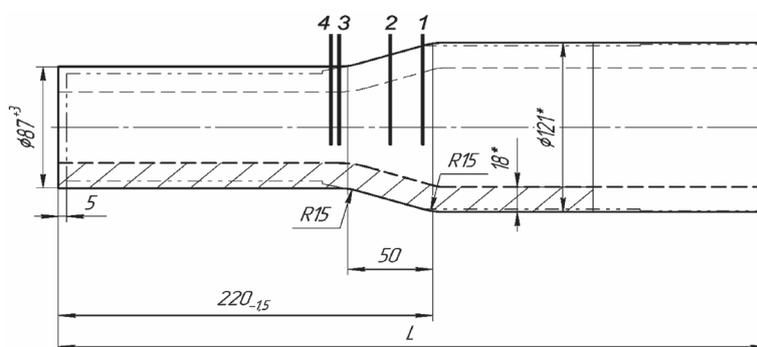


Рис. 2. Эскиз обжатой трубной заготовки: 1, 2, 3, 4 – номера сечений

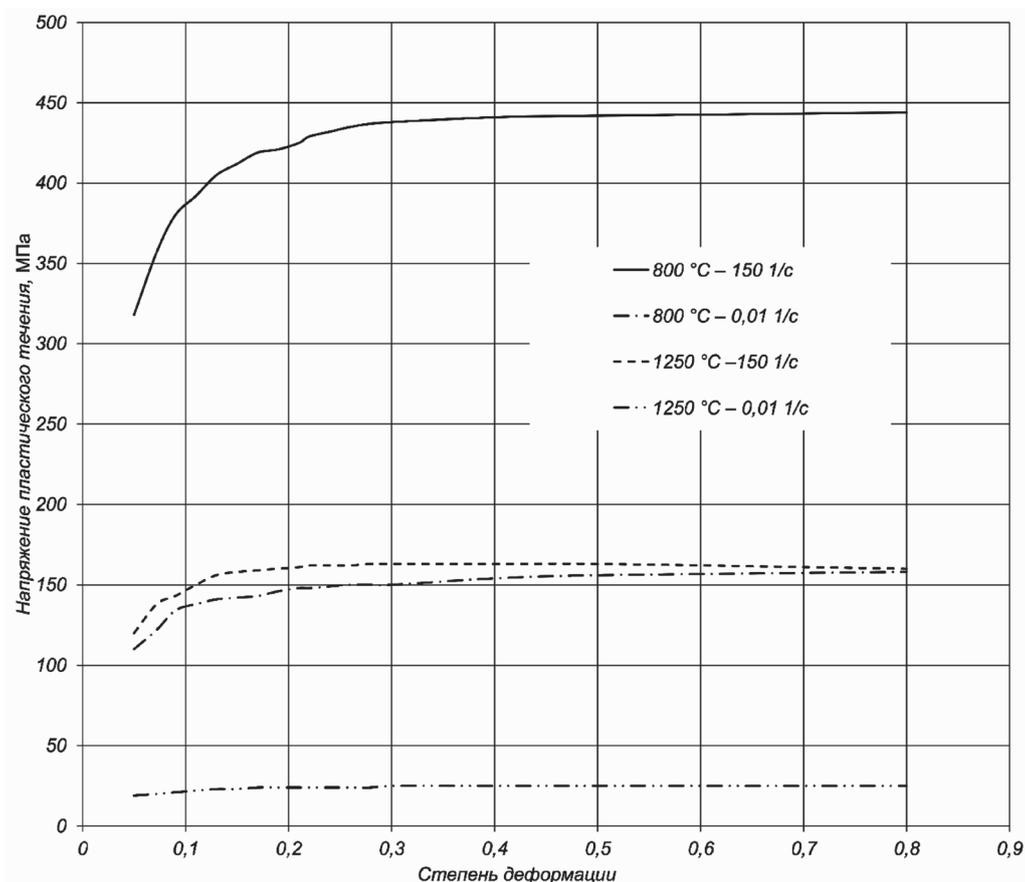


Рис. 3. Зависимости сопротивления деформации стали обрабатываемой заготовки от степени деформации, температуры и скорости деформации

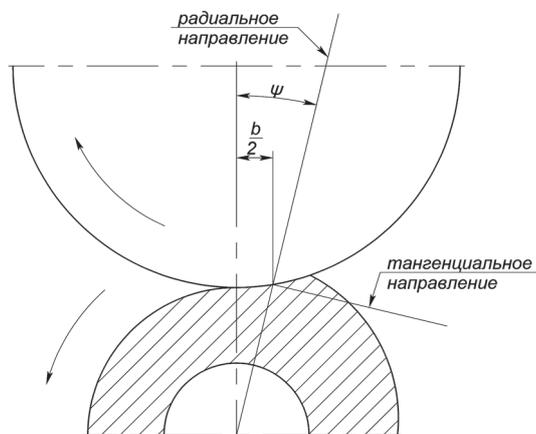


Рис. 4. Схема с радиальным и тангенциальным направлениями при ПВП

сила нормального давления, Q – результирующая сила). Сила Q раскладывается на тангенциальную силу Q_y и силу Q_z , действующую в радиальном направлении:

$$\bar{Q} = \bar{Q}_y + \bar{Q}_z.$$

Силы Q_y способствуют появлению растягивающих напряжений в тангенциальном направлении в начале очага деформации, а силы Q_z – появлению сжимающих напряжений в радиальном направлении.

На рис. 6 приведены кривые изменения коэффициентов тангенциальной и осевой скоростей по длине очага деформации для прошивки сплошной заготовки в гильзу. В случае прокатки труб

и сплошных заготовок характер изменения направления вектора сил трения является идентичным [5]. Таким образом, согласно известным теоретическим данным, в случае прокатки труб на всей длине очага деформации в зоне контакта заготовки с валками радиальные, тангенциальные и осевые напряжения являются сжимающими.

Распределение напряжений в деформируемой заготовке при установившемся процессе исследовали в четырех сечениях, перпендикулярных оси прокатки (рис. 2):

первое сечение – в начале обжимаемого участка (диаметр заготовки 116 мм);

второе сечение – в середине очага деформации (диаметр заготовки 104 мм);

третье сечение – в зоне пережима (диаметр заготовки 87 мм);

четвертое сечение – на выходе из пережима на расстоянии 5 мм от него.

Зависимости распределения напряжений по сечениям стенки заготовки представлены на рис. 7.

Анализ распределения напряжений обжимаемого участка заготовки длиной 50 мм показал, что в первом сечении в зоне контакта заготовки с валками преобладают сжимающие напряжения, на внутренней поверхности трубной заготовки только радиальные напряжения являются растягивающими.

В середине обжимаемого конусного участка в области контакта заготовки с валками все виды напряжений имеют значения, увеличивающиеся по модулю, остающиеся сжимающими. На внутренней поверхности трубной заготовки величины всехисследуемых напряжений увеличиваются, причем осевые напряжения переходят в растягивающие.

В зоне пережима сохраняются прежние тенденции по увеличению напряжений при движении от внешней поверхности заготовки к внутренней.

В четвертом сечении на внешней поверхности напряжения остались сжимающими, а их значения уменьшились по модулю. На внутренней поверхности заготовки напряжения близки к нулю.

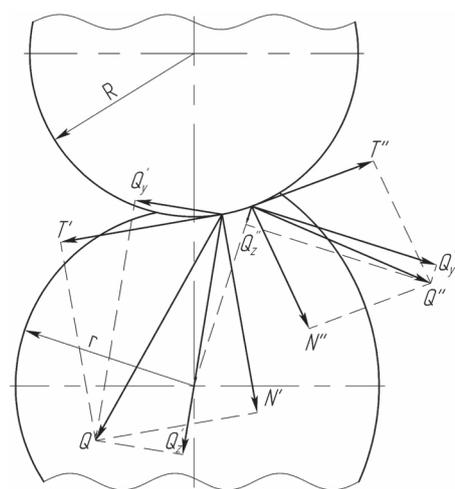


Рис. 5. Схема действия сил трения, нормального давления и их результирующих, а также проекций результирующих сил в тангенциальном и радиальном направлениях

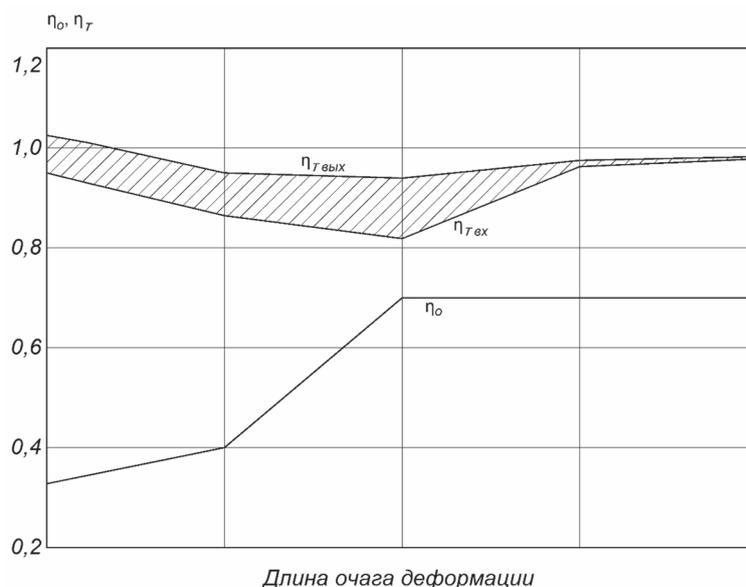


Рис. 6. Распределение коэффициентов скорости по длине очага деформации

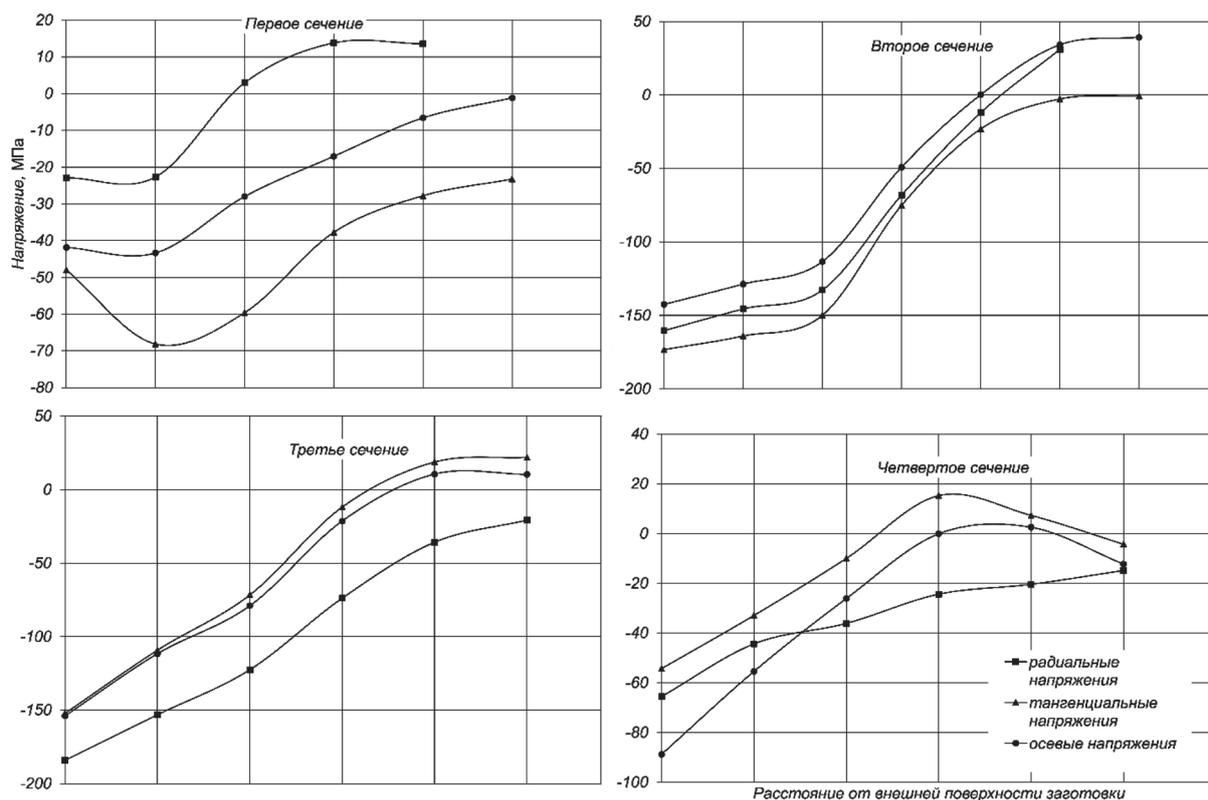


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений по толщине стенки в четырех сечениях

Во всех исследованных сечениях при удалении от внешней поверхности заготовки происходит уменьшение сжимающих напряжений, что вызвано увеличением объема металла, подвергнутого деформации.

Распределение нормальных напряжений по длине очага деформации на внутренней и внешней поверхностях трубной заготовки показано на рис. 8. На внутренней поверхности заготовки значения напряжений остаются относительно стабильными и близкими нулю. На внешней по-

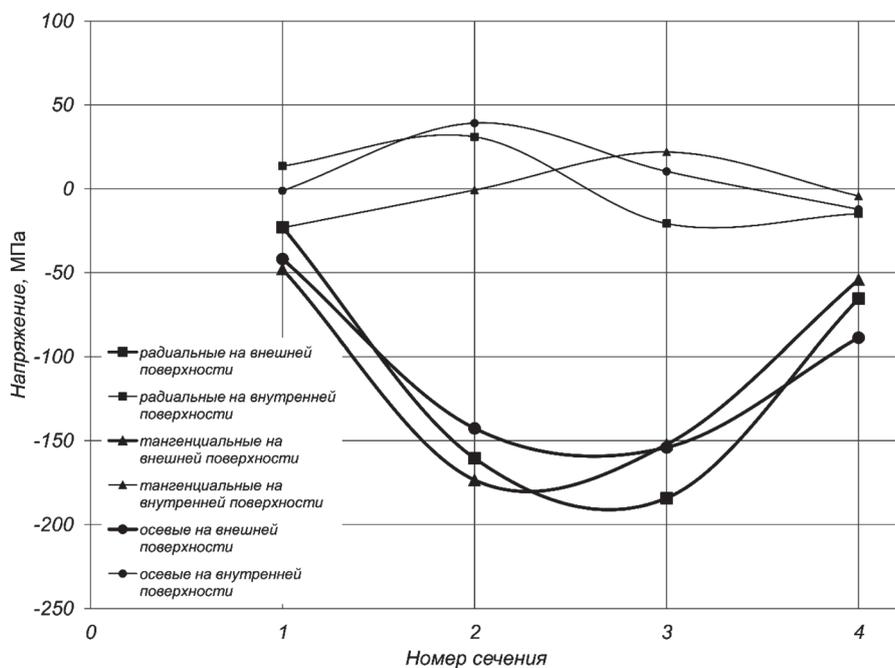


Рис. 8. Распределение нормальных напряжений по длине очага деформации

верхности в зоне контакта заготовки с валками нормальные напряжения достигают минимума, т. е. максимального по модулю сжимающего напряжения, между вторым и третьим сечениями (середина очага деформации и точка пережима соответственно).

Известно, что при ПВП возникает сложное НДС, близкое к схеме всестороннего сжатия, при котором напряжения в зоне контакта заготовки с валками и в зоне между валками имеют разный знак. Данный циклический характер возникающих напряжений позволяет активно влиять на свойства обрабатываемых заготовок. На рис. 9 отчетливо видны чередующиеся зоны растягивающих и сжимающих напряжений, которые находятся между зонами контакта валков с заготовкой и в этих зонах соответственно. Напряжения измерены в середине очага деформации (второе сечение) на поверхности трубной заготовки. Начало графика соответствует зоне контакта между заготовкой и валком.

Основной деформационный эффект проработки структуры металла в обжимаемой заготовке достигается за счет макросдвиговых процессов. При ПВП угол α влияет на траекторию тангенциального сдвига и глубину проникновения сдвиговой деформации во внутренние объемы металла [6, 7].

В литературе известны работы, где показано измельчение кристаллов кремния в силуминах с отметки примерно 40 мкм до 15–20 мкм при ПВП со степенью деформации 50 % (например, [8, 9]). Это существенно превосходит результат применения прессования, при котором даже при значительных степенях деформации (87,2 %) измельчения кристаллов кремния практически не происходит (размер кристаллов уменьшается до 35 мкм, что соответствует 32 % при ПВП).

Основными видами нагрузок на оси являются изгиб, кручение и совместное действие изгиба и кручения [10]. При любом способе деформации образуется макроструктура, характерная только для данного процесса обработки давлением. Эта сформированная макроструктура в последующем и будет определять уровень служебных свойств изделия. Производство изделий способами, которые позволяют создавать в них макроструктуру в соответствии с функциональным назначением, предоставляет большие возможности по улучшению потребительских свойств. Особенности приложения деформирующих усилий при ПВП формируют в заготовке макроструктуру, которая придаст осям конструктивную анизотропию, способную повысить ресурс работоспособности при эксплуатации [7].

Зависимость коэффициента осевой скорости η_0 металла заготовки при прохождении через очаг деформации, полученная в результате расчета, представлена на рис. 10. Как видно из рисунка, характер изменения коэффициента осевой скорости соответствует графику рис. 6. При диаметре валка в пережиме 300 мм и частоте вращения 20 об/мин линейная скорость на бочке валка

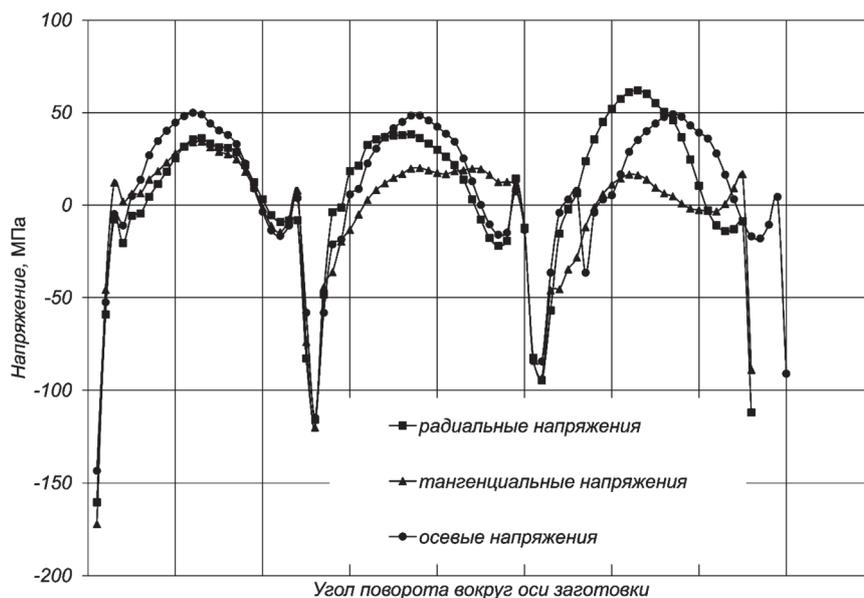


Рис. 9. Изменение нормальных напряжений на поверхности заготовки по окружности во втором сечении

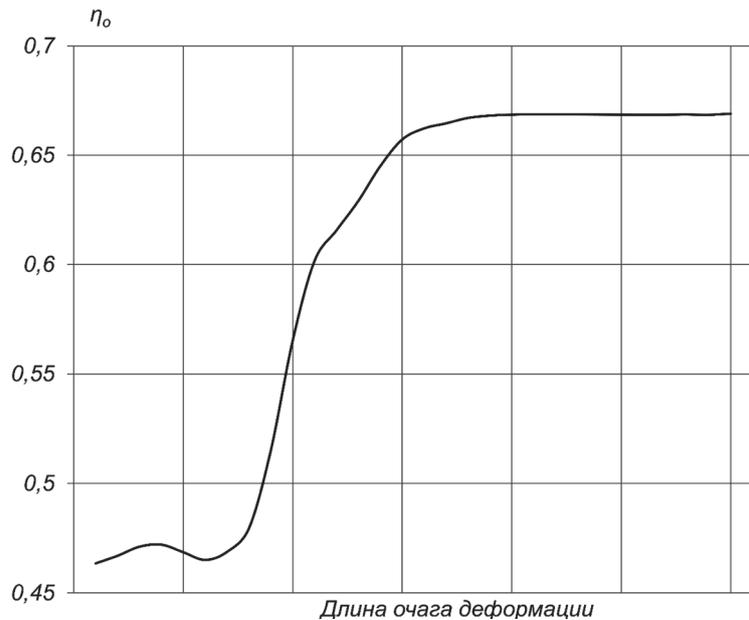


Рис. 10. Характер изменения коэффициента осевой скорости η_0 по длине очага деформации

равна 314 мм/с. При $\alpha = 5^\circ$ осевая составляющая равна 27,37 мм/с. При моделировании осевая скорость заготовки до очага деформации составляет 12,7 мм/с ($\eta_0 = 0,46$), за очагом деформации она равна 18,3 мм/с ($\eta_0 = 0,67$).

Соответствие построенной модели реальному процессу является ее важным параметром. В данном случае характер полученных зависимостей отвечает теоретическим представлениям, базирующимся на многочисленных экспериментах.

Литература

1. Луговский В. М., Третьяков Е. М. // Исследования в области обработки металлов давлением. М., 1960. С. 25–37.
2. Тетерин П. К. Теория поперечно-винтовой прокатки. М., 1971.
3. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М., 1973.
4. Потапов И. Н., Полухин П. И. Технология винтовой прокатки. М., 1990.
5. Потапов И. Н., Полухин П. И. Новая технология винтовой прокатки. М., 1975.
6. Романенко В. П., Фомин А. В., Бегнарский В. В. и др. // Металлург. 2012. № 10. С. 51–56.
7. Романенко В. П., Фомин А. В., Никулин А. Н. // Металлург. 2013. № 4. С. 63–68.
8. Богатов А. А., Панов Е. И. // Металлург. 2013. № 5. С. 75–81.
9. Панов Е. И. // Металлург. 2006. № 4. С. 69–75.
10. Школьник Л. М. Полые оси и валы. М., 1968.

V. A. TAMILA, V. V. LEVKOVICH

STRESS-STRAIN STATE AT THE PROCESS OF END FORMING OF THICK WALLED TUBES

Summary

The paper is focused on using the finite element method to simulate and analyze the process of end forming of thick walled tubes with three-roll mill. First, a geometric model of the process that considers roll profiles, offset angle and inclined angle of the rolls was constructed. Then, a three-dimensional finite element simulation was conducted to obtain stress distribution in the reduced workpiece.