

И. Е. Семенов, С. Н. Рыженко,
С. В. Поворов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ НА ПРОФИЛЕГИБОЧНОМ СТАНЕ С ЭЛАСТИЧНЫМ И ЖЕСТКИМ ИНСТРУМЕНТАМИ

Рассмотрен новый метод получения прямолинейных каналов в листовой заготовке на многовалковом стане с использованием эластичного рабочего инструмента. Рассмотренный метод сочетает высокую производительность и экономию металла заготовки. С помощью программного комплекса Ansys/Ls-Dyna разработана математическая модель, которая позволяет исследовать характеристики напряженно-деформированного состояния, а также энергосиловые параметры процесса, необходимые при конструировании технологического оборудования.

E-mail: sieprof@mail.ru

Ключевые слова: формовка, эластичный инструмент, теплообменный аппарат, математическое моделирование.

В последние годы в теплоэнергетике широкое применение находят теплообменные аппараты, в которых процесс передачи теплоты осуществляется через тонкую гофрированную стенку. Детали таких теплообменников получают листовой штамповкой, однако из-за больших габаритных размеров теплообменных панелей и развитого рельефа требуются прессы с большой силой (до 4 МН) и дорогостоящая оснастка к ним. Панели с продольными каналами можно делать также на профилегибочных станах, последовательно формируя каналы по ширине заготовки, но ввиду большого числа каналов, а также технологических ограничений процесса гибки на подобном оборудовании (один канал полностью формируется за несколько проходов) потребуется стан, число клеток которого будет очень большим. Плоские элементы панелей, имеющих продольные каналы, могут быть получены на стане локальной формовки, разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана и внедренном в производство в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского [1]. Формовка всех каналов на данном стане происходит за один проход при перемещении стола с профилированной матрицей и заготовкой под валком с эластичным покрытием и при предварительном прижиме валка к заготовке. Стоимость стана локальной гибки-формовки сравнима со стоимостью профилегибочного стана, однако на нем нельзя выполнять непрерывный процесс формовки. Непрерывная формовка возможна, если вместо подвижного стола применить вращающийся профилированный валок, как в клетки профилегибочного стана. При этом формовка всех каналов по ширине заготовки будет одновременной только за счет утонения заготовки и ширина получаемой детали будет равна ширине заготовки. В зависимости от глубины формовки может

потребоваться несколько клетей для постепенного увеличения глубины каналов. Реализация процесса формовки продольных каналов на профилегибочном стане позволит значительно сократить необходимое число клетей и уменьшить длину линии по сравнению с традиционным процессом профилирования на таком стане, а также увеличит производительность по сравнению со станом локальной формовки и позволит получать детали любой длины.

Профилегибочные линии широко распространены и имеют сравнительно простую конструкцию и невысокую стоимость. Таким образом, реализация процесса формовки продольных каналов на профилегибочном стане является перспективной. Процессы гибки и формовки тонколистовой заготовки на валковых машинах рассмотрены в работах [2].

На рис. 1 приведена схема процесса гибки-формовки тонколистовой заготовки на двухвалковой машине с эластичным покрытием одного из валков [2]. В данной схеме нижний валок является приводным, верхний валок с эластичной оболочкой — холостой. Формообразование заготовки происходит при ее прохождении между нижним фасонным валком и эластичной оболочкой верхнего валка при предварительном прижиге верхнего валка к заготовке.

Особенностью данного процесса является то, что изначально прямая листовая заготовка изгибается, принимая форму цилиндрической обечайки, на поверхности которой образован рифт.

Радиус изгиба заготовки зависит от следующих параметров: геометрических размеров инструмента и заготовки, механических свойств эластомера и заготовки, от прижима эластичной оболочки к заготовке. Изменяя значения этих параметров, можно изменять размеры получаемой детали. Так, например, увеличение диаметра нижнего валка и уменьшение прижима эластичной оболочки к заготовке приведет к увеличению радиуса получаемой детали. Для получения плоских панелей с продольными каналами предлагается процесс формовки выполнять в последовательных калибрах (рис. 2).

В данной схеме нижние валки четырех калибров являются приводными, верхние — холостыми. Верхние валки первого и третьего калибров имеют эластичную оболочку, поджатую с торцов металлическими шайбами (см. рис. 2). Оба валка второго и четвертого калибров жесткие. Профили нижних валков первого и второго калибров совпадают, также совпадают профили нижних валков третьего и четвертого

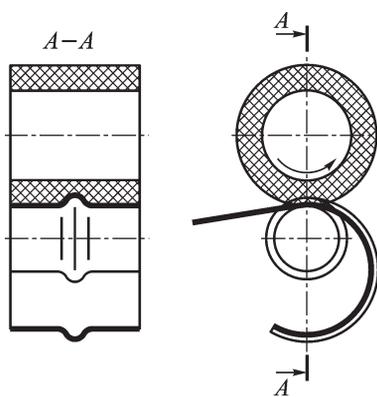


Рис. 1. Схема операции формовки листового материала на валках с эластичным покрытием



Рис. 2. Схема последовательной формовки каналов в четырех калибрах

калибров. На поверхности верхних валков второй и четвертой клетей имеются выступы радиусом 1,5 и высотой 2 мм и радиусом 6 и высотой 7,5 мм соответственно. Благодаря применению последовательно расположенных калибров становится возможным регулировать натяжение листа между проходами.

Растягивающие напряжения в заготовке между калибрами являются еще одним параметром, влияющим на радиус изгиба заготовки. Нижние валки клетей имеют общий привод с передаточным отношением, равным единице. Растяжение полосы между клетями достигается вследствие увеличения диаметра приводного валка последующей клетки на 2...3% относительно диаметра валка предыдущей клетки. Таким образом, линейная скорость в последующей клетке будет выше и силы трения будут создавать растягивающие напряжения. При этом будет наблюдаться небольшое проскальзывание заготовки относительно приводного валка.

Отметим, что при формовке каналов в первых двух клетях утонение листовой заготовки будет неравномерным [3]. Утонение заготовки будет максимальным у вершины формируемого канала и снизится до минимального значения у его основания. Чтобы максимально использовать металл заготовки в третьем калибре (см. рис. 2) реализуется процесс знакопеременной формовки, суть которого отражена на рис. 3.

Процесс деформирования заготовки происходит следующим образом. В начальный момент времени валки обеих клетей разведены на расстояние, равное толщине заготовки (0,8 мм), край заготовки запроваден в первую клетку. Из этого положения верхний валок первой клетки начинает опускаться на 4,5 мм, прижимая заготовку к профилированному валу и деформируя ее. После чего нижние валки обеих клетей приводятся в движение с заданной угловой скоростью, которая соответствует скорости прокатки 5 м/мин. При этом передний край заготовки удерживается от вертикального перемещения. После того

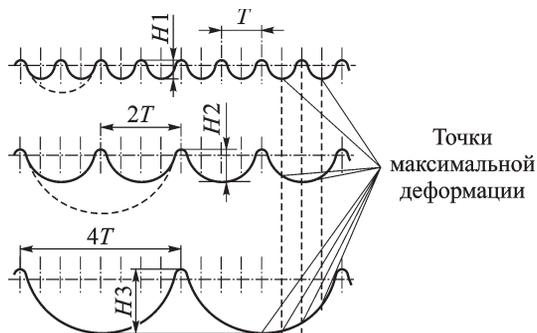


Рис. 3. Схема знакопеременной формовки каналов:

T — ширина канала после первого прохода; H_1 , H_2 , H_3 — высота канала после первого, второго и третьего проходов соответственно

как передний край заготовки заходит во вторую клеть, верхний валок опускается на 2,03 мм, увеличивая глубину канала и обеспечивая необходимый прижим заготовки к приводному валку для создания в заготовке растягивающих напряжений. В третьей клетке верхний вал с эластичной оболочкой прижимается к заготовке на 7,5 мм. При этом происходит деформирование заготовки и выворачивание части полученных ранее каналов. В четвертой клетке верхний вал с жестким валком опускается на 7,8 мм, при этом происходит увеличение глубины вывернутых в предыдущей клетке каналов.

Применение эластичного инструмента в первой клетке необходимо для создания в заготовке относительно небольшой предварительной деформации, благодаря которой увеличивается предельно допустимая деформация, получаемая заготовкой в следующей клетке [4]. В жестких валках второй клетки происходит окончательное формирование каналов.

Для определения напряженно-деформированного состояния заготовки и эластичного инструмента, а также для определения энергосиловых параметров процесса была разработана математическая модель на основе специализированного программного комплекса Ansys/Ls-Dyna. Данный программный комплекс позволяет решать динамические задачи деформирования твердых тел методом конечных элементов с учетом нелинейных свойств материалов и контактным взаимодействием тел.

Поскольку каналы формируются одновременно, то напряженно-деформированное состояние всех каналов, за исключением крайних (правого и левого), будет одинаковым независимо от числа каналов. Кроме того, каждый канал имеет плоскость симметрии, расположенную перпендикулярно к оси валка и проходящую через вершину канала.

Принимая указанные допущения, можно рассматривать при моделировании не всю заготовку сразу, а только ту ее часть, в которой будет

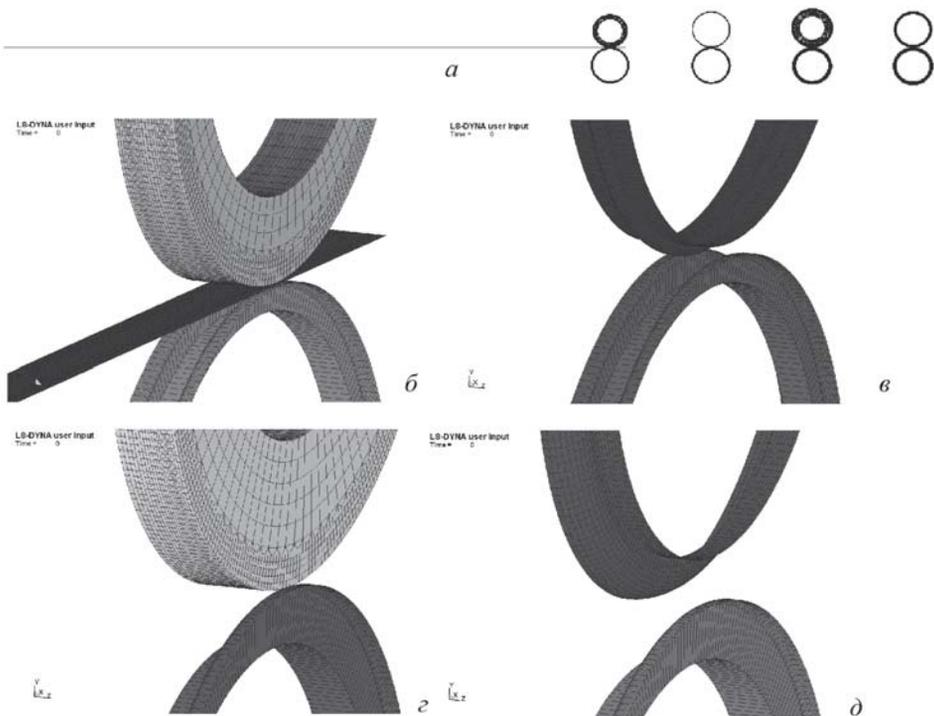


Рис. 4. Расчетная сетка:

a — общий вид; *б, в, г, д* — 1, 2, 3, 4-й калибры соответственно

отформована только половина (по ширине) одного канала. Благодаря этому значительно сокращается размерность задачи, т.е. числа ячеек и узловых точек расчетной сетки, и, следовательно, уменьшается время ее решения на ЭВМ. В целях сокращения размерности задачи, было принято, что верхний валок первой клетки и профилированные валки являются абсолютно жесткими телами, поэтому в модели отражена только их рабочая поверхность. Вид расчетной сетки, построенной с учетом принятых допущений, приведен на рис. 4.

Поведение полиуретановой оболочки описывается энергетической моделью Муни–Ривлина [5], для которой были заданы следующие параметры: константы двухпараметрической модели Муни–Ривлина $C_{10} = 0,83$, $C_{01} = 2,5$, плотность $\rho = 3000 \text{ кг/м}^3$ и коэффициент Пуассона $\nu = 0,49$.

Листовая заготовка толщиной 0,8 мм выполнена из алюминиевого сплава АД-1 со следующими механическими свойствами: предел текучести $\sigma_T = 45 \text{ МПа}$, модуль упругости первого рода $E = 10^5 \text{ МПа}$, модуль упрочнения $E_y = 110 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность $\rho = 2710 \text{ кг/м}^3$ [5].

При описании контакта были приняты следующие значения коэффициента трения: $\mu = 0,1$ — между профилированными валками и заготовкой; $\mu = 0,14$ — между заготовкой и эластомером; $\mu = 0,14$ — между эластомером и жестким валом.

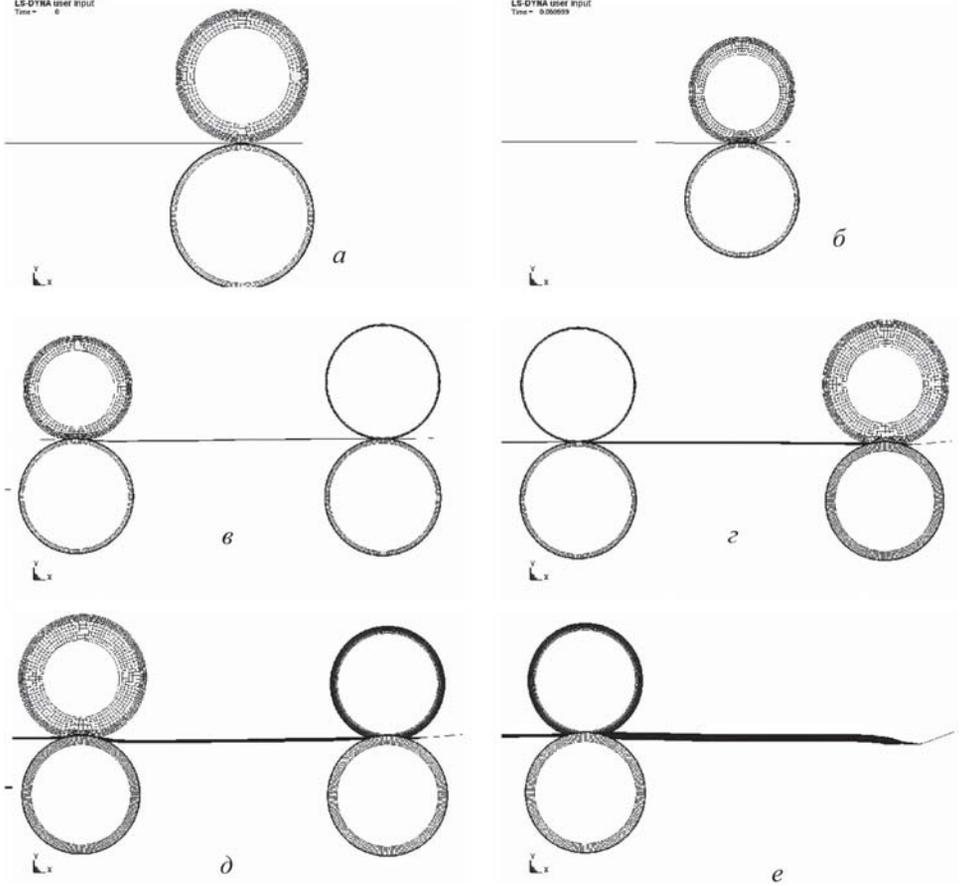


Рис. 5. Общий вид деформированной сетки в разные моменты времени:
a, б – 1-я клетка, $t = 0$ и $0,06$ с; *в* – 1-я и 2-я клетки, $t = 2$ с; *г* – 2-я и 3-я клетки, $t = 3,98$ с; *д* – 3-я и 4-я клетки, $t = 5,91$ с; *е* – 4-я клетка, $t = 7,83$ с

На рис. 5 показаны виды деформированной расчетной сетки в различные моменты времени, полученные в результате решения. Моменту времени $t = 0$ с соответствует начальное недеформированное состояние; $t = 0,06$ с – верхний валок первой клетки закончил вертикальное перемещение и приводные валки обеих клеток приводятся в движение; $t = 2$ с – захват заготовки во второй клетки; $t = 3,98$ с – захват заготовки в третьей клетки; $t = 5,91$ с – захват заготовки в четвертой клетки; $t = 7,83$ с – выход отформованной заготовки из четвертой клетки.

На рис. 6 показан вид деформированной расчетной сетки листовой заготовки и эластичного инструмента первой клетки.

Поле перемещений по оси Y заготовки при деформировании эластичным инструментом в первой клетки показано на рис. 7. По рисунку можно оценить глубину формируемого канала – она составляет $0,8$ мм.

На рис. 8 приведено поле распределения эквивалентных напряжений в заготовке при ее деформировании в первой клетки. Эквивалент-

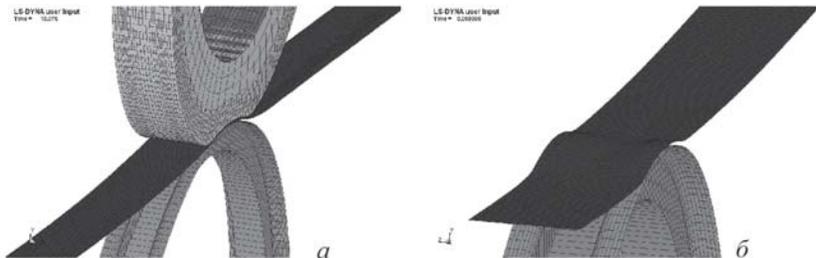


Рис. 6. Деформированная расчетная сетка (1-я клеть)

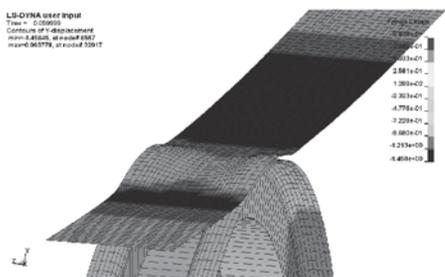


Рис. 7. Поля перемещений заготовки по оси Y

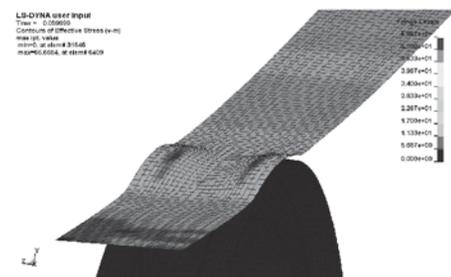


Рис. 8. Эквивалентные напряжения в заготовке

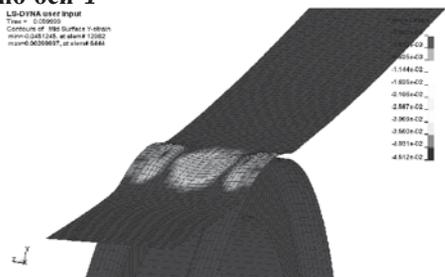


Рис. 9. Поле деформации по оси Y



Рис. 10. Поле толщины заготовки

ные напряжения определялись по энергетической теории пластичности Хубера–Мизеса–Генки. Результаты решения показывают, что максимальные эквивалентные напряжения сосредоточены в зоне перехода между плоским участком (строго говоря, этот участок является не плоским, а цилиндрическим (см. рис. 6, б), но, как будет показано далее, эта кривизна устраняется в силу действия растягивающей силы, создаваемой следующей клетью) и выпуклым участком. В этом месте эквивалентные напряжения составляют порядка 57 МПа. Наибольшие напряжения (50 МПа) наблюдаются на вершине выпуклой части заготовки.

На рис. 9 показано поле деформаций заготовки по оси Y (вертикальная ось). Из рисунка следует, что зоны максимальных деформаций совпадают с зонами максимальных эквивалентных напряжений (см. рис. 8). В зоне перехода между плоской и выпуклой частями заготовки деформации составляют 4,5 %. У вершины формируемого канала наблюдается деформация заготовки 4 %.

Поле распределения толщины деформированной заготовки представлено на рис. 10. Максимальное утонение заготовки происходит в месте перехода между плоской и выпуклой частями заготовки и составляет 0,75 мм при начальной толщине 0,8 мм. У вершины формируемого канала толщина заготовки составляет 0,78 мм.

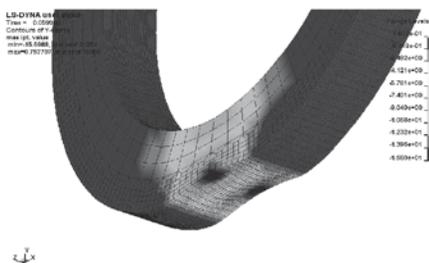


Рис. 11. Поле напряжений по оси Y в эластичной оболочке

Поле напряжений по оси Y в эластичном инструменте первой клетки показано на рис. 11. Из рисунка следует, что давление эластичной оболочки на поверхность заготовки в зоне плоской части составляет 15 МПа, в зоне формируемого выступа — 5,5 МПа.

На рис. 12 показана деформированная расчетная сетка. Видно, что тянущая сила, создаваемая во второй клетке, способствует выпрямлению заготовки, которая получает кривизну в направлении прокатки при деформировании в первой клетке.

Поле перемещения заготовки при ее деформировании во второй клетке показано на рис. 13. Глубина канала, формируемого во второй клетке, составляет 2,1 мм. Видно, что, выходя из второй клетки, заготовка сохраняет прямолинейность в направлении прокатки.

На рис. 14 приведено поле эквивалентных напряжений в заготовке при ее деформировании во второй клетке. Напряжения достигают наибольших значений в очаге деформации на плоской части заготовки

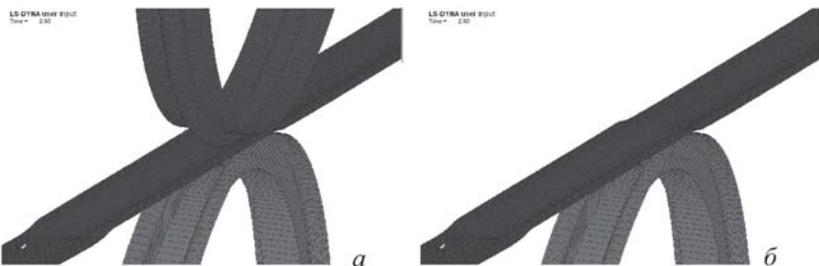


Рис. 12. Деформированная расчетная сетка (вторая клетка)

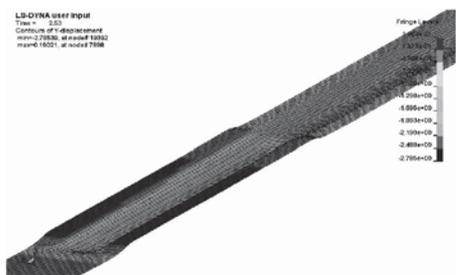


Рис. 13. Поле перемещения заготовки по оси Y

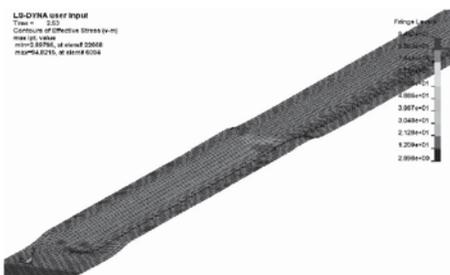


Рис. 14. Поле эквивалентных напряжений в заготовке

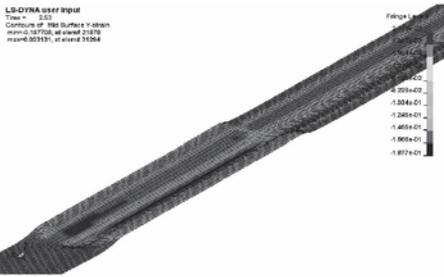


Рис. 15. Поле деформации заготовки по оси Y

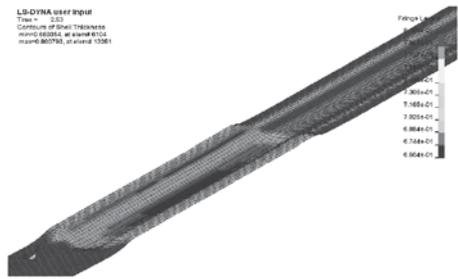


Рис. 16. Поле толщины заготовки

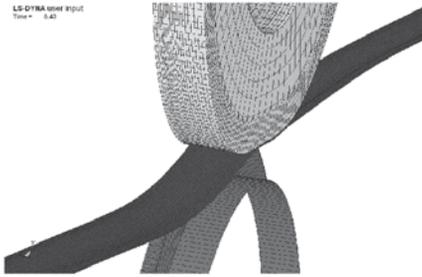


Рис. 17. Деформированная расчетная сетка (третья клеть)

и у вершины формуемого канала и составляют 85 и 78 МПа соответственно.

Поле деформации заготовки по оси Y во второй клетке показано на рис. 15. Видно, что максимальное деформирование заготовки происходит при вершине формуемого канала и составляет 16 %, в переходной зоне между плоской и выпуклой частями заготовки деформации составляют 10 %.

На рис. 16 приведено поле толщины заготовки при ее деформировании во второй клетке. Максимальное утонение заготовки происходит у вершины формуемого канала и в переходной зоне и составляет 0,68 мм. Следует отметить, что зона утонения при вершине канала более обширна, чем зона перехода от плоской части к выпуклой.

Деформированная расчетная сетка заготовки и эластичной оболочки третьей клетки, в которой происходит выворачивание, приведена на рис. 17.

На рис. 18 приведено поле перемещений заготовки при ее деформировании в третьей клетке; глубина канала, получаемого при выворачивании, составляет 3,5 мм.

Поле распределения эквивалентных напряжений в заготовке при ее деформировании в третьей клетке показано на рис. 19. Как следует из рисунка, распределение эквивалентных напряжений в очаге деформации довольно равномерно и составляет ≈ 55 МПа. Это объясняется тем, что при выворачивании заготовки утонения практически не про-



Рис. 18. Поле перемещения заготовки по оси Y

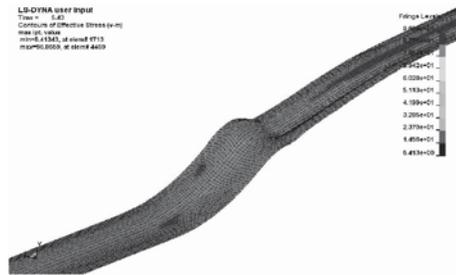


Рис. 19. Поле эквивалентных напряжений в заготовке

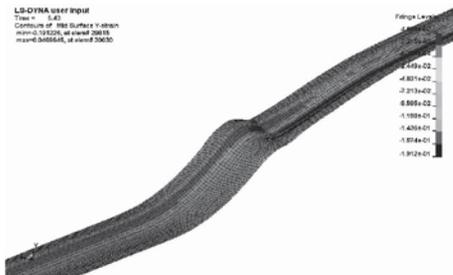


Рис. 20. Поле деформаций заготовки по оси Y



Рис. 21. Поле толщины заготовки при деформировании (третья клеть)

исходит, в отличие от предыдущих клетей, в которых канал образуется вследствие утонения заготовки.

На рис. 20 приведено поле деформаций заготовки по оси Y . Максимальные деформации имеют значения порядка 10%. Следует отметить, что расположение зон максимальных деформаций для нового канала, полученного после выворачивания, отличается от их расположения на канале, отформованном в двух предыдущих клетях. Так, для канала, отформованного в первых двух клетях, максимальные деформации были сосредоточены в зоне перехода от плоской части заготовки к выпуклой, и посередине отформованного канала (см. рис. 9 и 15). При выворачивании положение первой зоны максимальных деформаций не меняется, в то время как вторая зона, расположенная в середине отформованного канала, после выворачивания соответствует четверти вновь образованного канала.

Поле толщины листовой заготовки при ее деформировании в третьей клетке показано на рис. 21. Видно, что зоны максимального утонения заготовки при выворачивании перераспределяются так же, как и зоны максимальной деформации (см. рис. 20). Минимальная толщина заготовки при прохождении третьей клетки составляет 0,68 мм.

На рис. 22 приведено поле напряжений по оси Y в эластичной оболочке верхнего вала третьей клетки. Эластичная оболочка вала создает давление на поверхность заготовки, равное 18 МПа (в зоне плоской части) и 3,5 МПа (в зоне вершины канала).

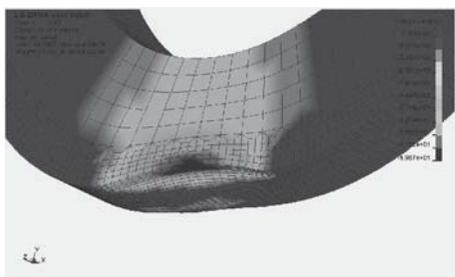


Рис. 22. Поле напряжений по оси Y в эластичной оболочке

На рис. 23 показана расчетная сетка заготовки, деформируемой в четвертой клетке, где происходит дополнительная формовка вывернутого ранее канала для увеличения его глубины.

Поле перемещений заготовки при ее деформировании в третьей клетке показано на рис. 24; глубина вывернутого ранее канала увеличивается до 7,5 мм.



Рис. 23. Деформированная расчетная сетка (четвертая клетка)



Рис. 24. Поле перемещения заготовки по оси Y

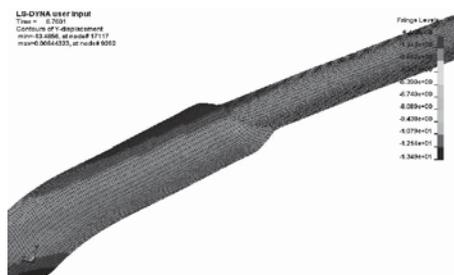


Рис. 25. Поле эквивалентных напряжений в заготовке

На рис. 25 показано поле эквивалентных напряжений в заготовке при ее деформировании в четвертой клетке. Из рисунка следует, что максимальные эквивалентные напряжения сосредоточены в зоне перехода от плоской части заготовки к выпуклой в очаге деформирования. В этой зоне значение напряжений составляет 115 МПа, в зоне формируемой выпуклости — 90 МПа.

Поле деформаций заготовки по оси Y показано на рис. 26. Максимальные деформации имеют значения порядка 20 %.

На рис. 27 показано поле толщины листовой заготовки при формовке в четвертой клетке. Из рисунка следует, что минимальная толщина равна 0,55 мм в зоне перехода от плоской части заготовки к выпуклой, толщина отформованной стенки составляет 0,6 мм у основания и 0,65 мм у вершины.

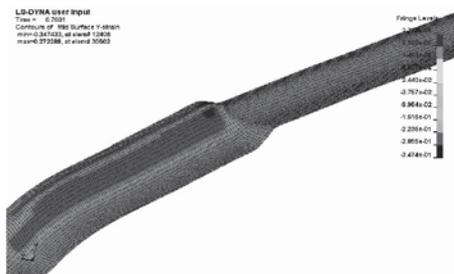


Рис. 26. Поле деформаций заготовки по оси Y

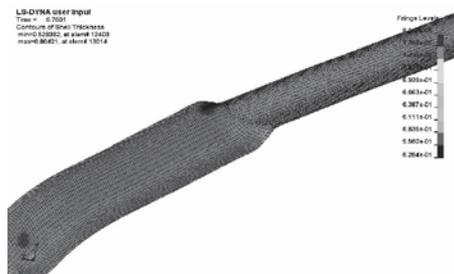


Рис. 27. Поле толщины заготовки при деформировании (третья клеть)

Таким образом, в результате анализа разработанной модели выявили, что на многовалковых машинах с эластичным покрытием валков можно получить плоские панели с продольными каналами, изготавливаемые ранее на стане локальной формовки [1], и при этом увеличить производительность, сделав процесс формовки непрерывным.

Госбюджетный проект № 2.1.2/1785, выполненный в рамках аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)” Федерального агентства по образованию Министерства науки и образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов И. Е. Современное оборудование для деформирования тонколистового металла эластичным рабочим инструментом // 50 лет кафедре оборудования и технологии прокатки. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – С. 35–44.
2. Закиров И. М., Лысов М. И. Гибка на валках с эластичным покрытием. – М.: Машиностроение, 1985.
3. Исаченков Е. И. Штамповка резиной и жидкостью. – М.: Машиностроение, 1967.
4. Феофанова А. Е. Исследование предельного формоизменения при местной листовой формовке с целью интенсификации процесса и технологических параметров: Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.03.05. – М.: МГТУ “СТАНКИН”, 2004.
5. Бухина М. Ф. Техническая физика эластомеров. – М.: Химия, 1984.

Статья поступила в редакцию 23.04.2010

Сергей Владимирович Поворов окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Аспирант кафедры “Оборудование и технологии прокатки”. Автор более 10 научных работ в области пластического деформирования тонколистового металла.

S.V. Povorov graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Post-graduate of “Equipment and Technologies of Rolling” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 publications.

