

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ И ПРОШИВКИ ЗАГОТОВКИ. РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА ОБЖАТИЯ НЕПРЕРЫВНО-ЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

EXAMINATION OF BILLETS SCREW ROLLING AND FLASHING PROCESSES. DEVELOPMENT OF NEW COBBING METHOD OF CONTINUOUSLY CASTED BILLET

А.А. Богатов¹ (omd@mtf.ustu.ru), Д.А. Павлов¹ (andimon.62@mail.ru), Д.Ш. Нухов¹ (danis_keeper@mail.ru)
ФГАО ВПО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина»

Abstract

A three-high mill of screw rolling for cobbing of the billet which enables use of continuously casted billet in tube manufacturing process, which is economically justifiable, as well as increase the steel structure quality and technological properties was installed on TPA-80 of JSC "SinTZ". While assimilating the new process the problem of increase of defective products in the form of tube buckles has been identified, and the reason for this increase is the formation of blinks on the back end of the billet and the subsequent formation of D-rings while piercing, their break-away and getting into the deformation zone. In this article the reasons for formation of tube buckles while rolling are examined, problems of mathematical modeling of screw rolling and flashing are set and solved, and the results of full-scale experiments directed to examine this question are evaluated. Practical recommendations of solving the manufacturing problem of defective products in form of tube buckles are given.

На трубопрокатном агрегате ТПА-80 цеха Т-3 ОАО «Синарский трубный завод» производят горячекатаные трубы диаметром 30 - 89 мм, с толщиной стенки 3,0 - 13,0 мм из углеродистых, низколегированных и легированных марок сталей. На ТПА-80 освоена новая технология производства высококачественных насосно-компрессорных труб на модернизированном трубопрокатном агрегате ТПА-80. С целью внедрения технологии изготовления труб из непрерывно-литой заготовки в линии ТПА-80 был установлен трехвалковый стан и освоена технология радиально-сдвиговой прокатки (РСП). Изменение технологической схемы производства труб на агрегате представлено на рис. 1

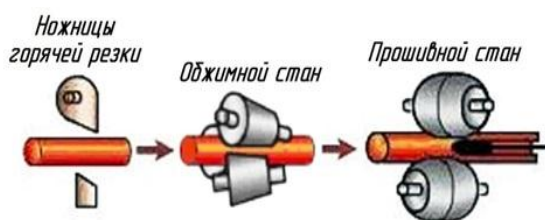


Рис.1. Изменение технологической схемы производства труб на ТПА-80

Достоинством РСП, использованной в модернизированной схеме производства труб, является интенсивная проработка литой структуры и повышение технологических

характеристик заготовки. В результате модернизации существующей технологии производства труб на ТПА-80 достигнуто снижение себестоимости труб на 10%, повышена производительность агрегата на 15%, увеличен выход годного с 98,8% до 99,08%. Применение непрерывно-литых заготовок после обжатия позволило улучшить условия прошивки, в результате чего уменьшилась разностенность получаемых гильз в среднем на 1-2%, а износостойкость линеек повысилась на 8-10%. Важным результатом исследования явилось достижение рациональных режимов обжатия непрерывно-литой заготовки диаметром 156 мм до диаметра 120 мм, которые обеспечили получение мелкозернистой структуры стали перед прошивкой и достижение высоких показателей при производстве насосно-компрессорных труб в хладостойком и коррозионностойком исполнении. При освоении новой технологии были выявлены две проблемы: сохранение пористости в осевой зоне заготовки вследствие неравномерно распределенной по сечению степени деформации; образование утяжин на концах заготовки после РСП, являющихся причиной отрыва кольцевых отслоений при прошивке (рис. 2) и увеличение количества несоответствий по вмятинам.

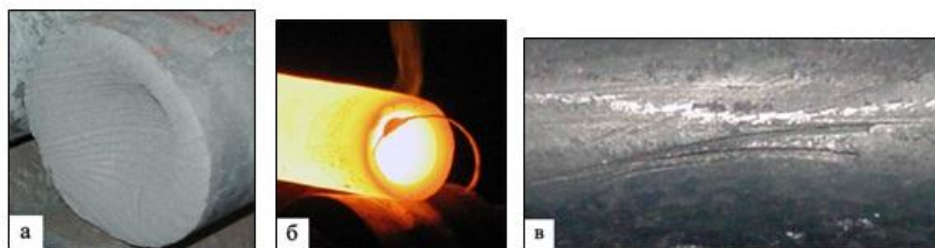


Рис. 2. Образование утяжины на заготовке (а), кольцевое отслоение на гильзе (б), характерный вид дефекта «вмятина» на наружной поверхности труб (в)

1. Конечно-элементное моделирование формоизменения заднего конца заготовки при обжатии на трехвалковом стане винтовой прокатки

Причиной образования утяжин на концах заготовок при винтовой прокатке, по мнению П.К. Тетерина [1], Э.Зибеля [2], И.А. Фомичева [3], В.С. Смирнова [4] и др., является неоднородная деформация по сечению заготовки, значение компоненты тензора скорости деформации $\dot{\epsilon}_{xx}$ на поверхности превышает это значение в осевой зоне.

Для изучения влияния относительного обжатия (по диаметру) заготовки, угла подачи, времени охлаждения и исходной формы конца заготовки, калибровки валков обжимного стана на размеры образующихся утяжин было выполнено математическое моделирование процесса обжатия круглых заготовок, с использованием программного комплекса Deform-3D. Влияние каждого фактора определялось путем сравнения относительного размера утяжин, образующихся при прокатке заготовок, с различными его значениями при прочих равных условиях.

Постановка задачи математического моделирования производилась с учетом выбранных при планировании вычислительного эксперимента технологических параметров обжатия. При этом угол раскатки $\varphi=12^\circ$, скорость вращения валков $n=100$ об/мин. Температура инструмента принята постоянной и равной 150°C . Геометрия заготовки, а также толкателя была создана с помощью средств самой программы Deform-3D. Твердотельная модель валков обжимного стана выполнена в программе Компас-3D, а затем импортирована в программу конечно-элементного моделирования путем сохранения в файл с расширением “stl”. На рис. 3 представлена модель трехвалкового обжимного стана.

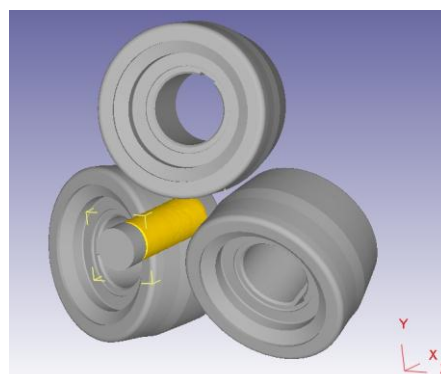


Рис. 3. Модель трехвалкового обжимного стана Deform-3D

Из библиотек материалов для заготовки была выбрана сталь AISI-1045, аналогичная стали Ст45 по российскому стандарту, при этом использовалась вязкопластическая среда. Температура нагрева заготовок согласно промышленным данным принята равной 1200°C . Длина заготовки $l_z = 400$ мм была принята минимальной, но достаточной для формирования полного очага деформации. Граничные условия для температурной задачи были сформулированы как граничные условия третьего рода: $q = \alpha \cdot \Delta\Theta$, где q - плотность теплового потока на граничной поверхности, $\text{Вт}/\text{м}^2$; α - коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$; $\Delta\Theta$ - разность температур, $^\circ\text{C}$. Для границ «заготовка-воздух» и «заготовка-валок» коэффициент теплоотдачи принят в соответствии с рекомендациями, представленными в программе Deform-3D, соответственно равными 0,02 и $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$. Взаимодействие заготовки с инструментом было описано законом трения по Зибелю: $\tau = \psi \tau_s$, где τ - напряжение трения, МПа; ψ - показатель трения; τ_s - сопротивление деформации материала на сдвиг, МПа. Согласно рекомендациям из программы Deform-3D показатель сил трения принят равным $\psi = 1$.

Ниже описано влияние исследуемых технологических параметров процесса прокатки на деформацию металла на заднем конце непрерывно-литой заготовки. Вначале была изучена зависимость размеров утяжин от величины обжатия (диаметра заготовки). Внешний вид утяжин на заднем конце заготовок в продольном сечении представлен на рис. 4 (а). При использовании заготовок диаметром 150 и 156 мм было установлено, что с ростом величины относительного обжатия происходит увеличение глубины утяжины. Диаграмма, отображающая изменение размеров утяжин в зависимости от обжатия представлена на рис. 4 (б).

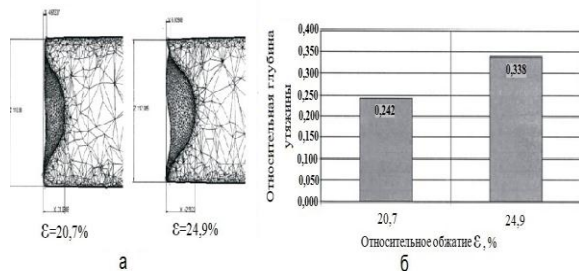


Рис. 4. Внешний вид утяжин в зависимости от величины обжатия (а) и зависимость размера утяжин от относительного обжатия (б)

О влиянии угла подачи валков обжимного стана на глубину образующейся утяжины можно судить по графику, представленному на рис. 5. Видно, что с увеличением угла подачи происходит уменьшение размеров утяжин, а, следовательно, снижается вероятность образования поверхностных дефектов на готовых трубах.

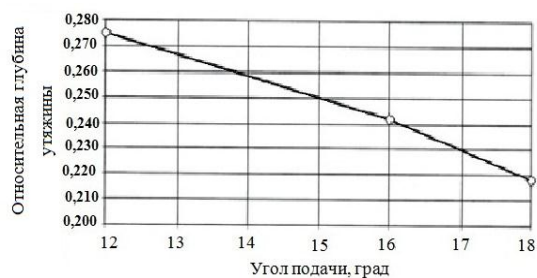


Рис. 5. Зависимость размеров утяжин от угла подачи

2. Исследование влияния формы заднего конца заготовки на образование утяжины при обжатии в программе Deform-3D

В ходе наблюдения за процессом обжатия было замечено, что на заготовках, имеющих после раскря на ножницах горячей резки смятый конец выпуклой формы, образование утяжин происходит в меньшей степени, чем на

заготовках с перпендикулярным (ровным) концом. В связи с этим было исследовано влияние исходной формы конца заготовки на глубину утяжины, образующейся при обжатии, с помощью программного комплекса Deform-3D, и на образование кольцевого отслоения металла на гильзе после прошивки на прошивном стане (см. п.4.). Используя результаты математического моделирования процесса обжатия и качественных результатов деформации конца заготовки [5], были предложены помимо плоского торца (рис.6а) три варианта заготовок: с выпуклым торцом (рис. 6б); с усеченным конусом и выпуклым торцом (рис. 6в,6г).

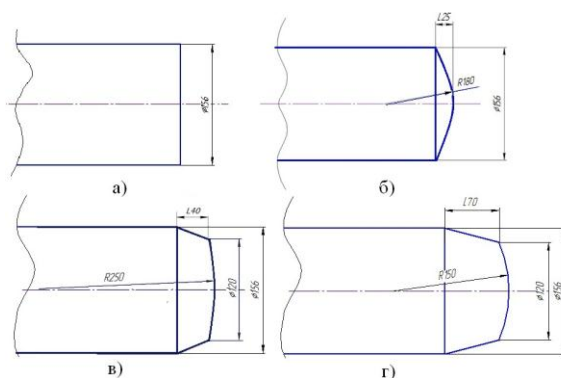


Рис. 6. Формы заднего конца заготовок

Моделирование процесса обжатия заготовок с четырьмя различными формами заднего конца (рис. 6а,б,в,г) в Deform-3D осуществлялось при угле подачи валков $\beta=16^\circ$, угле раскатки $\phi=12^\circ$ и скорости вращения валков $n=80$ об/мин. Все остальные условия проката при постановке задачи оставались такими же, как в п.1. Схема для измерения торца заготовки после моделирования процесса обжатия представлена на рис. 7.

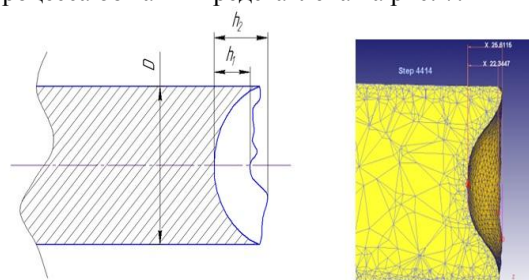


Рис. 7. Схема для измерения заднего торца заготовки после моделирования процесса обжатия

Результаты измерения утяжин для четырех вариантов формы заднего конца заготовки сведены в табл. 1

Таблица 1

Результаты измерения утяжин для четырех вариантов формы заднего конца заготовки

№ Варианта	Форма заднего конца	D, мм	h ₁ , мм	h ₂ , мм	h _{ср} , мм
1	Заготовка с прямым торцом, (R=∞)	120,00	35,62	48,03	41,83
2	Заготовка с выпуклым торцом, (L=25 мм, R=180 мм)	120,00	22,34	25,61	23,97
3	Заготовка с усеченным конусом и выпуклым торцом, (L=40 мм, R=250 мм)	120,00	15,01	18,08	16,55
4	Заготовка с усеченным конусом и выпуклым торцом, (L=70 мм, R=150 мм)	120,00	10,08	13,10	11,59

Из табл. 1 видно, что с увеличением длины конуса L от 0 до 70 мм происходит уменьшение средней глубины утяжины от 41,83 до 11,59 мм.

3. МКЭ – моделирование процесса образования кольцевого отслоения при прошивке в программе Deform-3D

С целью изучения влияния формы заднего конца заготовки после обжатия на характер формоизменения металла были поставлены и решены задачи МКЭ-моделирования процесса прошивки в программе Deform-3D. Исследовались заготовки с глубиной утяжины: $l_{ym1} = 30$ мм, $l_{ym2} = 16$ мм, $l_{ym3} = 0$ мм и $l_{ym4} = -25$ мм (заготовка с выпуклым торцом заготовки). Геометрические модели валков, линеек и оправки были созданы с помощью программы Компас-3DV10. Заготовка, проводки и толкатель были построены средствами самой программы DEFORM-3D. Позиционирование валков производилось в зависимости от угла подачи $\beta = 12^\circ$ и угла раскатки $\varphi = 8^\circ$. Сведение валков обеспечило получение диаметра заготовки на выходе из прошивного стана 120 мм. Температура нагрева заготовок принята равной 1200°C , температура инструмента – 150°C , температура окружающей среды (воздуха) – 20°C . Показатель сил трения между валком и заготовкой был принят равным $\psi = 1$, между оправкой и заготовкой – $\psi = 0,2$, между линейкой и заготовкой – $\psi = 0,4$. Для обеспечения достоверности расчетных данных число конечных элементов для заготовки диаметром 120 мм и длиной 700 мм было принято равным 200000. Единственным

варьируемым параметром в исследовании являлась глубина утяжины заднего конца заготовки l_{ym} . В качестве постоянных параметров приняты: диаметр заготовки – $d_z = 120$ мм, углы подачи – $\beta = 12^\circ$, угол раскатки – $\delta = 8^\circ$ число оборотов валков – $n = 100$ об/мин, калибровка и настройка инструмента прошивного стана.

Решение задач методом конечных элементов позволяет лишь рассматривать образование так называемых «кольцевых отслоений» (рис. 8), что в свою очередь дает возможность оценить эффективность предлагаемых технических решений для предотвращения образования кольцевых отслоений на гильзах.

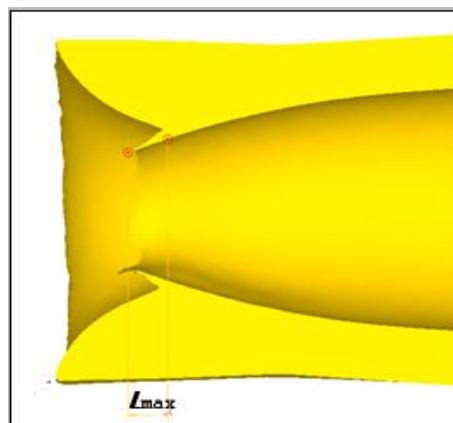


Рис.8. Кольцевое отслоение на гильзе

Результаты расчета длины кольцевого отслоения l_{max} приведены в табл. 2, по данным которой был построен график (рис.9) зависимости длины кольцевых отслоений l_{max} от глубины утяжины заднего конца заготовки l_{ym} перед прошивкой.

Таблица 2

Результаты математического моделирования

Глубина утяжины l_{ym} , мм	-25	0	16	30
Длина «кольцевого отслоения» l_{max} , мм	11,64	12,60	13,08	16,08

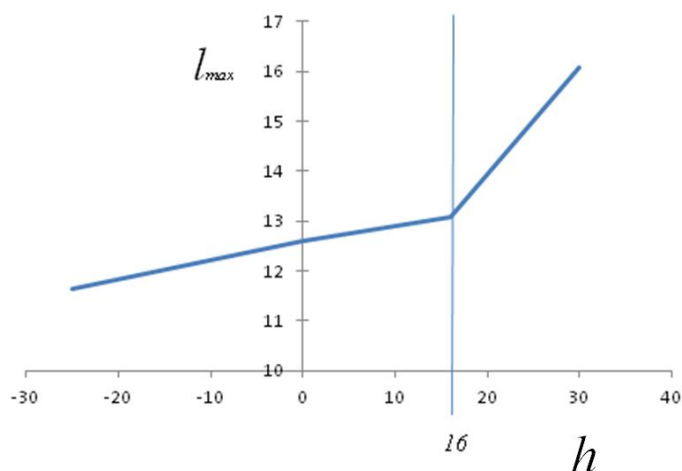


Рис.9. График зависимости длины кольцевого отслоения l_{\max} от глубины утяжины h заднего конца заготовки перед прошивкой

Согласно графику, наименьшее значение длины кольцевого отслоения l_{\max} имеет место при прокатке заготовки с профилированным концом $h = -25$ мм. При $h > 16$ мм резко возрастает длина кольцевого отслоения металла, и, как следствие, вероятность образования кольцевого отслоения на гильзе при прошивке. Оптимальная настройка технологического процесса обжатия непрерывно-литой заготовки и профилирование заднего конца заготовки должно обеспечить значение $h < 16$ мм и уменьшить уровень брака труб по вмятинам. В промышленных опытах было установлено, что при глубине утяжин $h < 16$ мм уменьшается уровень брака по вмятинам, при $h > 16$ мм толщина кольцевого отслоения уменьшается и возрастает риск его отрыва. Отрыв кольцевых отслоений приводит к образованию вмятин при раскатке труб. С использованием программного комплекса Deform-3D было проведено исследование, направленное на определение влияния формы заднего конца заготовки при прошивке. Единственным варьируемым параметром в исследованиях являлась глубина утяжины заднего конца заготовки, которая составляла: 38,8, мм, 24,1 мм, 14,5 и 4,7 мм (такие размеры утяжин были получены при прокатке заготовок с формой заднего конца, представленного на рис. 6, в ходе промышленного эксперимента).

В качестве постоянных параметров приняты: диаметр заготовки $d_s = 120$ мм, угол подачи $\beta = 12^\circ$, угол раскатки $\varphi = 8^\circ$, число оборотов валков 100 об/мин и настройка инструмента прошивного стана.

Как было уже сказано выше, решение задач методом конечных элементов позволяет лишь рассматривать образование так называемых «кольцевых отслоений» (рис. 10). Введем следующие обозначения концевой части

гильзы: S_i – толщина кольцевого отслоения; l_i – длина кольцевого отслоения (см.рис.10).

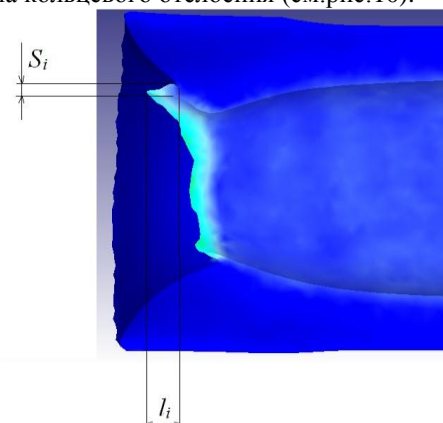


Рис. 10. Кольцевое отслоение на заднем конце гильзы

Результаты расчета значений толщины кольцевого отслоения S_i , полученные в ходе математического моделирования процесса прошивки, приведены в табл. 3. Из табл. 3 видно, что наибольшая толщина кольцевого отслоения, равная $S_{cp} = 6,0$ мм, имеет место при прошивке заготовки с минимальной глубиной утяжины, равной 4,7 мм (см. табл. 3, вариант 4). При глубине утяжины, равной 14,5 мм средняя толщина кольцевого отслоения составляет $S_{cp} = 5,15$ мм, а при $h_{cp} = 24,1$ мм $S_{cp} = 1,56$ мм. Таким образом, при глубине утяжины менее 14,5 мм вероятность отрыва кольцевого отслоения на заднем конце гильзы и образования вмятин на готовых трубах мала.

Значения толщины основания кольцевого отслоения на заднем конце гильзы

Геометрический параметр	Значения средней глубины утяжины h_{cp} , мм на заднем конце заготовки перед прошивкой			
	38,750 (1 вариант)	24,100 (2 вариант)	14,500 (3 вариант)	4,700 (4 вариант)
S_{max} , мм	2,18	2,34	5,93	6,708
S_{min} , мм	0,78	0,78	4,368	5,304
Scp , мм	1,48	1,56	5,148	6,006

4. Исследование влияния формы заднего конца заготовки на образование утяжины в ходе промышленного эксперимента

Опытные заготовки из стали 38Г2СФ диаметром 156 мм после нагрева подвергли прокатке на трехвалковом стане, а затем половина из них была прокатана на прошивном стане. Всего было прокатано восемь опытных заготовок, четыре из них были сброшены в карман после обжимного стана, а четыре гильзы – в карман после прошивного стана для исследования концевой части. Концевые части заготовок были изготовлены обработкой резанием. Результаты измерения утяжин представлены в табл. 4. На рис. 11-14 представлены фотографии задних концов обжатой заготовки и гильзы: а – после обжимного стана; б – после прошивного стана.



Рис. 11. Фото задних концов обжатой заготовки и гильзы (заготовка с плоским торцом)



Рис.12. Фото задних концов обжатой заготовки и гильзы (заготовка с выпуклым торцом размером $L=25\pm 5$ мм с $R=180$ мм)

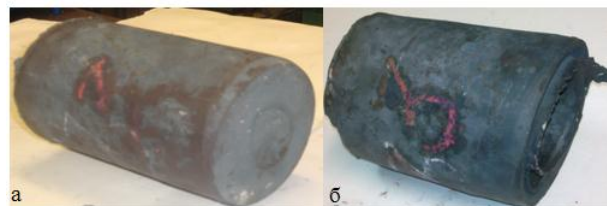


Рис.13. Фото задних концов обжатой заготовки и гильзы (заготовка с усеченным конусом и выпуклым торцом размером $L=40\pm 5$ мм с $R=250$ мм)



Рис. 14. Фото задних концов обжатой заготовки и гильзы (заготовка с усеченным конусом и выпуклым торцом размером $L=70\pm 5$ мм с $R=150$ мм)

Таблица 4

Размеры заднего конца заготовки после обжатия					
№ варианта	Форма заднего конца	D, мм	h ₁ , мм	h ₂ , мм	h _{ср} , мм
1	Заготовка с прямым торцом, (R=∞)	120,00	33,50	44,00	38,75
2	Заготовка с выпуклым торцом, (L=25 мм, R=180 мм)	120,00	23,40	24,80	24,10
3	Заготовка с усеченным конусом и выпуклым торцом, (L=40 мм, R=250 мм)	120,00	10,50	18,50	14,50
4	Заготовка с усеченным конусом и выпуклым торцом, (L=70 мм, R=150 мм)	120,00	4,60	4,80	4,70

Из табл.4 видно, что с увеличением L от 0 до 70 мм средний размер утяжины уменьшается от 38,75 мм до 4,70 мм.

5. Исследование влияния глубины утяжины на образование кольцевого отслоения при прошивке в ходе промышленного эксперимента

Результаты расчета значений толщины кольцевого отслоения S , полученные в ходе математического моделирования, приведены в табл. 5. По данным табл. 1 и 4 были построены графики (рис. 15), характеризующие среднюю

глубину утяжины $h_{ср}$ в зависимости от варианта формы заднего конца заготовки при промышленном исследовании и моделировании процесса обжатия в программе Deform-3D. Аналогичным образом по данным табл. 3 и 5 были построены графики (рис. 16), характеризующие среднюю толщину кольцевого отслоения $S_{ср}$ в зависимости от варианта формы заднего конца заготовки при промышленном исследовании и моделировании процесса обжатия в программе Deform-3D.

Таблица 5

Значения толщины кольцевого отслоения гильзы, полученные в ходе промышленного эксперимента

Геометрический параметр	Значения средней глубины утяжины $h_{ср}$, мм на заднем конце заготовки перед прошивкой			
	38,750	24,100	14,500	4,700
S_{max}	0,650	1,600	4,600	5,200
S_{min}	0,450	0,850	4,200	4,200
$S_{ср}$	0,550	2,450	4,400	4,700

Проанализировав данные табл. 3 и 5, можно заметить, что при глубине утяжины $h < 14,5$ мм, которая образуется при обжатии заготовки с профилированным концом по варианту 3 (табл. 4) среднее значение толщины кольцевого отслоения составляет $S_{ср} \geq 4,4$ мм. Опытные значения глубины утяжины и толщины кольцевого отслоения меньше расчетных значений (рис. 15 и 16). Из

рис. 11б видно, произошел отрыв кольцевого отслоения, так как толщина его от 0,45 до 0,65 мм, а из рис. 12б – отрыв произошел не по всему периметру торца. Из рис. 13б и 14б видно, что отрыва кольцевого отслоения не произошло, так как толщина отслоения колеблется от 4,2 до 5,2 мм.

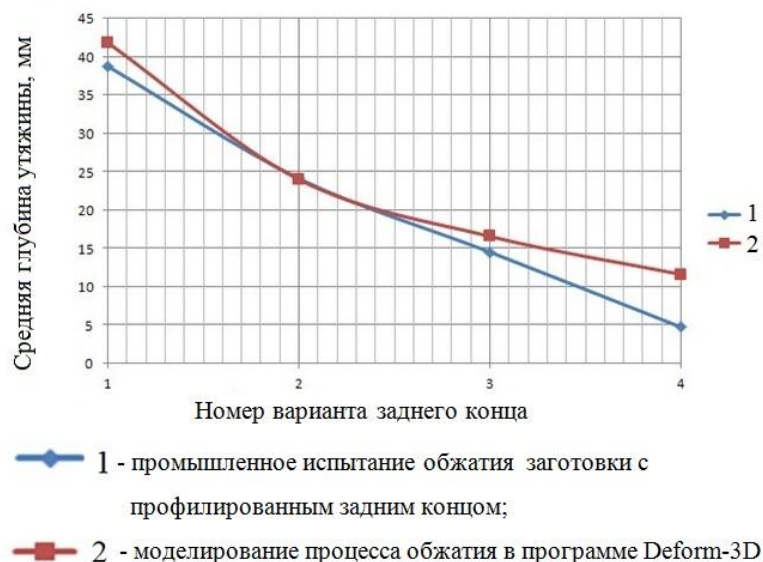


Рис. 15. Графики, характеризующие среднюю глубину утяжины h_{cp} в зависимости от варианта формы заднего конца заготовки при промышленном исследовании и моделировании процесса обжатия в программе Deform-3D

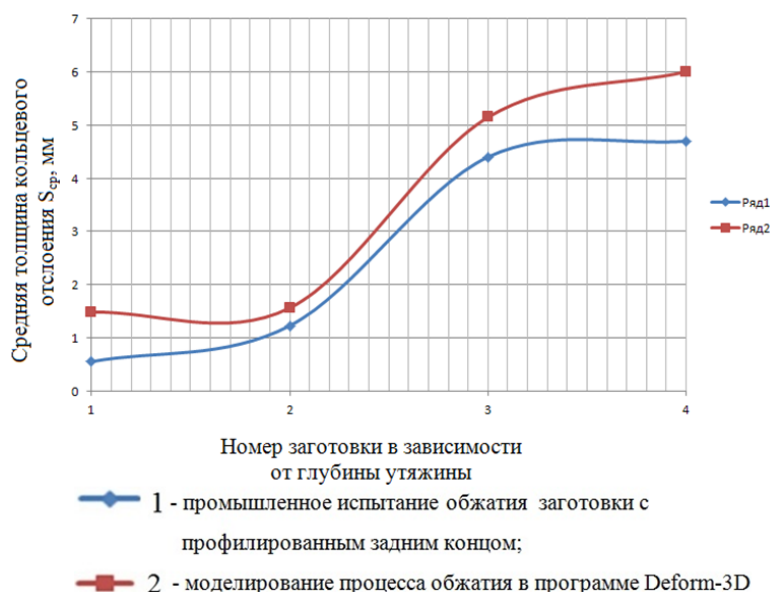


Рис. 16. Сравнительный анализ средней толщины основания отслоившегося металла гильзы S_{cp} , рассчитанной теоретически и полученной в эксперименте

6. Разработка нового способа прокатки непрерывно-литой заготовок в трехвалковом обжимном стане

На кафедре «Обработка металлов давлением» совместно с ОАО «СинТЗ» предложен новый способ обжатия непрерывно-литой заготовки на трехвалковом стане винтовой прокатки, отличающийся тем, что с целью предотвращения образования утяжины на заднем конце непрерывно-литой заготовки ее обжатие осуществляют одновременно с профилированием заднего конца в виде усеченного конуса (рис. 17).

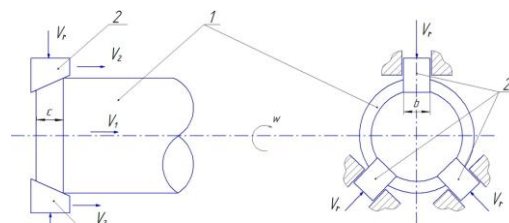


Рис. 17. Принципиальная схема формирования усеченного конуса на заднем конце цилиндрической заготовки с помощью инструмента деформации в процессе обжатия в трехвалковом стане радиально-сдвиговой прокатки

На рис. 17 1- заготовка; 2- инструмент деформации (бойки).

Профилирование заднего конца заготовки 1 осуществляется инструментом деформации 2, который имеет радиальное и осевое перемещения, при этом, с целью повышения качества формы заднего конца заготовки, инструмент перемещают в осевом направлении со скоростью равной осевой составляющей скорости заготовки ($V_1=V_2$). Для обеспечения устойчивого процесса обжатия заготовки 1, формирование усеченного конуса на заднем конце заготовки начинается при установившемся процессе прокатки. Новый способ обжатия в трехвалковом стане радиально-сдвиговой прокатки был исследован с помощью физического моделирования на лабораторной установке и математического моделирования.

7. Физическое моделирование способа формирования конца заготовки в виде усеченного конуса

Физическое моделирование процесса осуществлялось на образцах из пластилина. Задачей исследования являлось определение рациональной калибровки инструмента деформации и режимов профилирования заднего конца заготовки. Испытания проводились на установке с использованием привода фрезерного станка в лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением». При физическом моделировании образец и инструмент деформации (бойки) не имеют осевого перемещения, то есть $\Delta V = V_2 - V_1 = 0$ (где V_2 - составляющая скорости в направлении осевого перемещения инструмента деформации, V_1 - составляющая скорости в направлении оси заготовки). В ходе лабораторных испытаний опробовано пять калибровок бойков. С использованием каждой калибровки бойков обжато по 2 образца. После каждого испытания производились измерения обжатого конца образца в соответствии со схемой, представленной, на рис. 18 результаты измерения представлены в табл. 6.

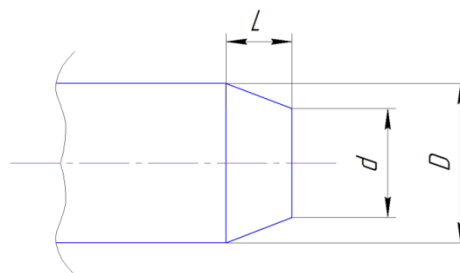


Рис. 18. Схема для измерения обжатого конца образца

Образец в процессе профилирования не имел осевого перемещения, что позволяло значительно упростить конструкцию установки для физического моделирования процесса профилирования заднего конца заготовки при обжатии. При разработке плана эксперимента были использованы критерии подобия. Образцы были изготовлены из скульптурного пластилина. Все образцы изготовлены в соответствии с масштабом моделирования в соотношении 1:3 к размерам непрерывно-литой заготовки. Диаметр рабочей части образца 50 мм (рис. 19), то есть

$$m = \frac{D_{заг}}{D} = \frac{150}{50} = 3,$$

где $D_{заг}$ - диаметр заготовки, прокатываемой на обжимном стане; D - диаметр образца. Длина концевой части L и диаметр образца на торце d определены также в масштабе 1:3. Частота оборотов образца во всех испытаниях устанавливалась равной 300 об/мин, что соответствует частоте оборотов заготовки при прокатке в обжимном стане при частоте вращения валков 75 об/мин. Время обжатия 2 с. В модельном эксперименте размеры бойков и величина их радиального перемещения выполнены также в масштабе 1:3. Для уменьшения трения при прессовании использовалась вакуумная смазка. Перед экспериментом образец крепился в стакане с приводом от фрезерного станка (рис. 20 и 21).

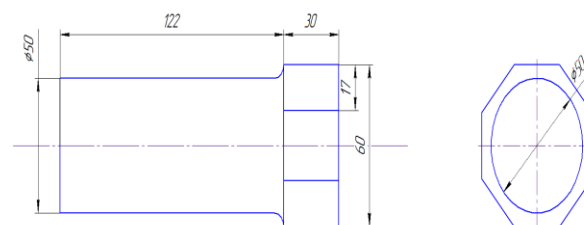


Рис. 19. Форма и размеры образца

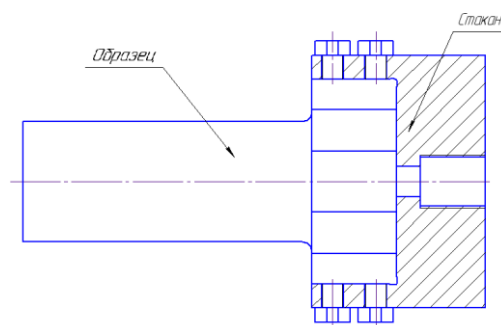


Рис. 20. Крепление образца в стакане



Рис. 21. Фотографии устройства для физического моделирования процесса обжатия образца, закрепленного в стакане

Таблица 6

Результаты измерения торцов образцов

№ калибровки бойков	D		d		L		Наличие налипания пластилина на боковую поверхность бойков
	1	2	1	2	1	2	
1	51,1	51,0	37,7	39,2	35,0	31,0	Значительное налипание
2	50,0	50,5	38,5	42,0	31,0	24,0	Значительное налипание
3	51,2	51,5	42,5	40,5	25,5	22,5	Значительное налипание
4	49,2	49,7	39,7	40,2	23,5	24,0	Сравнительно меньшее налипание
5	51,2	49,7	39,1	38,5	25,0	24,5	Налипания нет

Установлено, что увеличение длины конической части образца, ухудшение условий трения на контактной поверхности, а также применение тесных калибровок инструмента деформации (бойков), приводят к налипанию

пластилина на инструмент и вызывает неоднородность распределения деформации в радиальном направлении. В ходе физического моделирования процесса профилирования концов образцов из пластилина была найдена

калибровка бойков, обеспечивающая получение заднего конца заготовки без утяжины в виде усеченного конуса с размерами $D=49,7$ мм, $d=38,5$ мм, $L=24,5$ мм, которые соответствуют размерам заднего конца заготовки, представленного на рис. 6г, с учетом масштаба моделирования 1:3.

8. Математическое моделирование способа формирования конца заготовки в виде усеченного конуса

Математическое моделирование процесса осуществлялось в программном комплексе DEFORM-3D. Задачей исследования являлось создание математической модели процесса профилирования заднего конца заготовки, уточнение калибровки инструмента и режимов деформации, найденных в ходе физического моделирования, а также исследование влияния

распределения температур по сечению заготовки на формоизменение заднего конца в процессе профилирования.

Твердотельные модели заготовки, бойков и привода вращения были созданы в графической программе КОМПАС-3D V12, сохранены в файлы с расширением «stl» и перенесены в среду DEFORM-3D для постановки задачи. Следует отметить, что при создании твердотельной модели заготовки длина рабочей части была уменьшена с 122 мм (рис. 15) до 60 мм для увеличения скорости расчета. На рис. 22 и 23 представлены соответственно твердотельные модели заготовки и устройства для моделирования процесса профилирования заднего конца в среде DEFORM-3D.

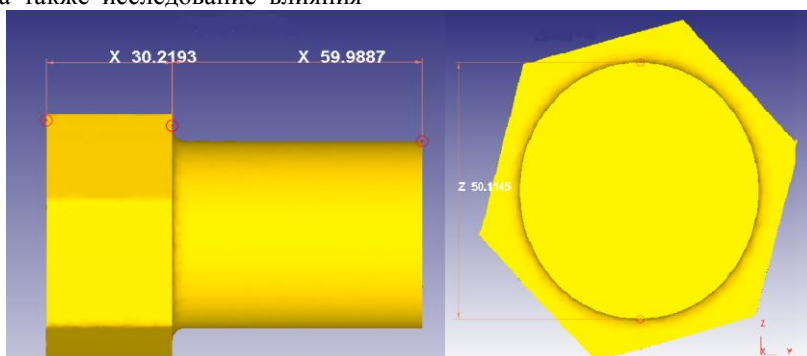


Рис. 22. Модель заготовки в среде DEFORM-3D

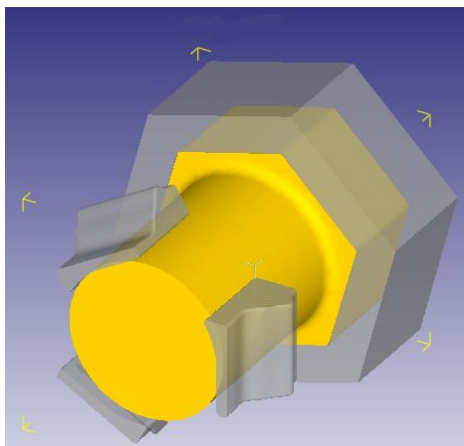


Рис. 23. Твердотельная модель устройства для моделирования процесса профилирования заднего конца заготовки

Для уменьшения времени расчета в очаге деформации было создано окно плотности (рис. 24), в котором размер элементов заготовки составил 1 мм, а вне окна – 4 мм. Степень

деформации элемента, при достижении которой происходит автоматическое обновление сетки, была принята равной $\varepsilon=0,15$.

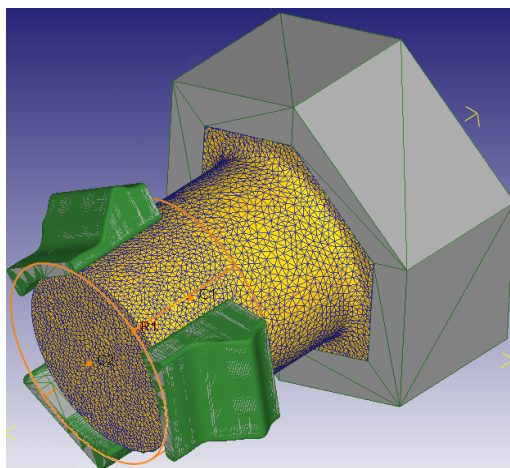


Рис. 24. Окно плотности в очаге деформации

В качестве материала заготовки использовалась сталь AISI-1045, являющаяся аналогом российской стали марки Д. При постановке тепловой задачи температура наружного слоя заготовки принималась равной

1000 °С, а температура внутреннего слоя – 1200 °С. На рис. 25 представлено распределение температур по сечению заготовки. Температура бойков и привода вращения принималась равной 150°С.

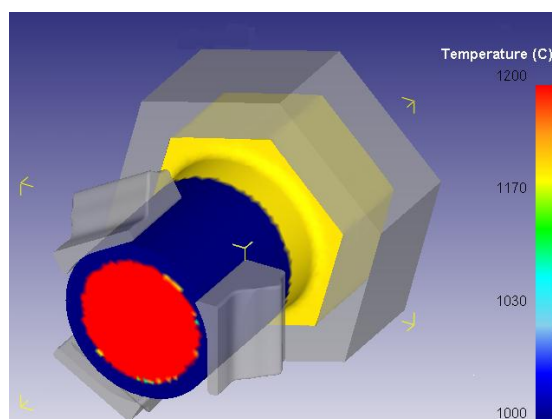


Рис. 25. Распределение температур по сечению заготовки

Частота вращения привода заготовки и бойков задавались равными соответственно 300 об/мин и 30 об/мин, как и при физическом моделировании процесса профилирования заднего конца заготовки.

В процессе математического моделирования был получен конец заготовки в виде усеченного конуса с достаточно ровным торцом без утяжины (рис. 26). Максимальная длина конуса на спрофилированном конце составила 25,4 мм, что хорошо согласуется с результатами физического моделирования, в ходе которого получена длина усеченного конуса $24,5 \div 25$ мм (см. табл. 6). Следует также отметить, что для получения заднего конца заготовки в виде усеченного конуса с ровным торцом без утяжины в ходе математического моделирования пришлось в 2 раза увеличить ширину бойков в сравнении с шириной бойков (калибровка №5), применяемых при физическом моделировании.

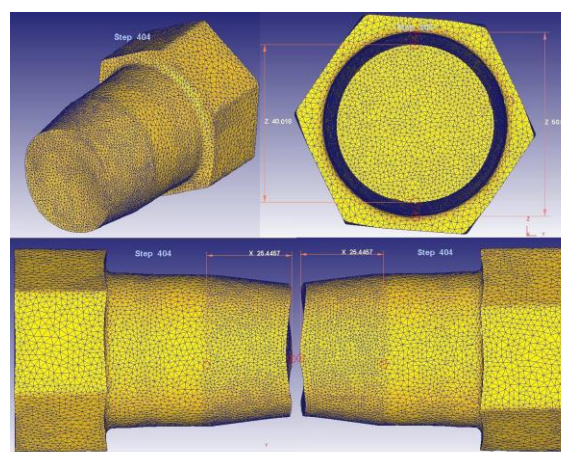


Рис. 26. Спрофилированный конец заготовки, полученный в ходе математического моделирования

Заключение

Согласно данным, полученным в ходе промышленного исследования и при моделировании в программе Deform-3D, наименьшие значения глубины утяжины получаются при обжатии заготовки с усеченным конусом и выпуклым торцом размерами $L=70$ мм, $R=150$ мм (рис.6г). При этой же форме заднего конца заготовки получается наибольшая толщина кольцевого отслоения, что подтверждается результатами математического и промышленного эксперимента. Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование заготовок с формой заднего конца, представленного на рис. 6г, позволит снизить вероятность обрыва кольцевого отслоения в процессе прошивки, что, в свою очередь приведет к снижению объема брака по вмятинам. Установлено также, что результаты лабораторных, промышленных экспериментов и математического моделирования качественно соответствуют друг другу. Разработана математическая модель нового способа профилирования заднего конца заготовки в виде усеченного конуса. Результаты математического моделирования профилирования заднего конца заготовки с достаточной для инженерной практики точностью совпадают с результатами физического моделирования.

Список литературы

1. Тетерин П.К. Теория попереной и винтовой прокатки. Изд. 2-е, перераб. и доп.-М.: Металлургия, 1983.-270с.
2. Зибель Э. Обработка металлов в пластическом состоянии. Пер.с нем.-М.: Металлургиздат, 1934.-400 с.
3. Фомичев И.А. Косая прокатка. – М.: Металлургиздат, 1963-180с.
4. Смирнов В.С. Поперечная прокатка. – М.:Машгиз, 1948.-195 с.
5. Овчиников Д.В., Богатов А.А., Ерпалов М.В. //Черные металлы 2012. №3. С. 18-21