

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Ан.В. Серебряков*, Ал.В. Серебряков**, С.П. Буркин**, Г.В. Шимов**

* ОАО «Первоуральский новотрубный завод», Andrey.Serebryakov@chelpipe.ru

**Уральский федеральный университет, spb@mtf.ustu.ru

Введение

Высокие требования к точности размеров сечения и чистоты обработки внутренней поверхности труб, используемых для изготовления оболочек ТВЭЛов атомных реакторов, определяются условиями реакторных сборок и необходимостью снижения склонности аустенитных сталей к межкристаллитной коррозии.

Бесшовные холоднодеформированные особотонкостенные трубы из стали ЭИ-847 по ТУ 14-159-293-2005 используются в качестве оболочки теплового элемента (ТВЭЛа). Конструкция ТВЭЛа состоит из двух труб, расположенных труба в трубе. Кольцевой зазор между трубами заполняют топливом. Тепловая энергия снимается как с наружной, так и с внутренней поверхности ТВЭЛа. ТВЭЛы устанавливают в кассету, кассеты в сборку. Точность размеров используемых труб определяет геометрическую стабильность реакторной сборки, и как следствие, стабильность ядерно-физических и тепло-гидравлических характеристик реактора.

Для особотонкостенных труб из стали ЭИ-847 по ТУ 14-159-293-2005 установлены специальные требования к точности размеров. Предельные отклонения размеров не должны превышать:

- для труб ϕ 5,2X0,2 мм и ϕ 9,4X0,2 мм по наружному диаметру $\pm 0,020$ мм, по толщине стенки $\pm 0,030$ мм;
- для труб $\phi_{\text{вн}}$ 6,6X0,2 мм и $\phi_{\text{вн}}$ 11,6X0,2 мм по внутреннему диаметру $\pm 0,020$ мм, по толщине стенки $\pm 0,030$ мм;

Таким образом, задача заключается в достижении указанной точности и стабильности размеров по длине каждой трубы, труб в партии и между партиями. Указанные трубы могут быть изготовлены короткооправочным волочением.

Известна и достаточно обоснована [1] целесообразность применения чистового короткооправочного волочения особотонкостенных коррозионностойких труб для атомной энергетики взамен холодной прокатки на станах ХПТР. Волочение на закрепленной оправке повышает радиационную стойкость и снижает склонность к межкристаллитной коррозии труб при работе в среде расплавов щелочных металлов. Однако, применение традиционной технологии волочения на закрепленной оправке, которая широко используется в производстве труб общего применения, не гарантирует требуемую точность размеров особотонкостенных труб и не позволяет избавляться от широко распространенного дефекта

«кольцеватость», являющегося следствием продольных упругих колебаний короткой оправки.

Многолетний опыт авторов настоящей работы показал техническую целесообразность применения при изготовлении особотонкостенных труб из нержавеющей стали традиционного способа короткооправочного волочения, при этом высокую точность размеров труб обеспечивать корректировкой размеров калибрующих элементов волочильного инструмента, а качество внутренней поверхности – изменением конструктивной схемы крепления стержней оправок.

Обеспечение точности размеров особотонкостенных труб

В традиционном способе волочения на закрепленной оправке трубу деформируют, обжимая по диаметру и стенке в конической волоке на цилиндрической оправке, которую устанавливают в зоне калибрующего пояска волоки. Наружный диаметр трубы задают диаметром калибрующего пояска волоки, а внутренний – диаметром наружной цилиндрической поверхности оправки. Низкая точность размеров труб в этом случае связана с упругими и тепловыми деформациями трубы после завершения волочения, а также внеконтактной деформацией трубы на выходе из волоки. Если диаметры калибрующего пояска волоки и рабочей поверхности оправки выполнены равными номинальным размерам готовой трубы, то реальные диаметры трубы оказываются меньше номинальных, а толщина стенки – больше номинальной, что делает невозможным получение особотонкостенных труб повышенной точности, в частности для оболочек ТВЭЛов ядерных реакторов.

Положительные и статистически надежные результаты в повышении точности размеров сечения труб с относительной толщиной стенки готовой трубы менее 0,03, изготавливаемых волочением на закрепленной оправке, получены за счет рационального выбора диаметров оправки и калибрующей части волоки.

Труба-заготовка предготовых размеров, предназначенная для получения волочением на закрепленной оправке с предписанным по условиям формирования требуемых механических, физических и эксплуатационных свойств коэффициентом вытяжки по сечению λ готовой трубы с размерами: диаметром внутренней поверхности $d \pm \delta_v$ и толщиной стенки $S \pm \delta_s$,

или диаметром наружной поверхности $D \pm \delta_n$ и толщиной стенки $S \pm \delta_s$, где δ_v , δ_n , δ_s - допуск на размер соответственно внутреннего, наружного диаметров и толщины стенки трубы, после термической обработки, подготовки поверхностей к волочению и нанесения технологической смазки подается на линейный волочильный стан короткооправочного волочения. Наружный диаметр трубы-заготовки принимают

$$\text{равным } D_0 = \frac{D - S}{K} + S\lambda K, \text{ где } K = \frac{\lambda_s}{\lambda} -$$

отношение коэффициентов вытяжки по стенке и по сечению трубы, а исходную толщину стенки трубы-заготовки – $S_0 = S\lambda K$. Исходные размеры трубы-заготовки D_0 и S_0 обеспечивают предыдущей обработкой трубы волочением или холодной роликовой прокаткой на стане ХПТР.

В волокодержатель волочильного стана устанавливается волока с конической рабочей поверхностью и калибрующим пояском диаметром $D_{\text{вол}} = D(1 + 0,035 \log \lambda)$, а на стержне оправки закрепляется оправка с диаметром рабочей цилиндрической поверхности $D_{\text{оп}} = d(1 + 0,025 \log \lambda)$.

Далее осуществляется волочение в штатном скоростном режиме.

Зависимости для определения диаметров волоки и оправки, полученные опытным путём, имеют высокую статистическую надёжность и позволяют получать особотонкостенные трубы с узкими полями допусков на внутренний и наружный диаметры и толщину стенок труб, в частности из коррозионностойких сталей. Назначаемая вытяжка является наиболее статистически значимым параметром, поскольку определяет как силу волочения, так и деформационный разогрев труб во время волочения, а, следовательно, и величины упругой и тепловой деформации труб после завершения волочения. От вытяжки зависит также и величина внеконтактной деформации трубы на выходе из зоны обжатия.

Значения коэффициента вытяжки λ за проход выбираются не менее 1,25, поскольку в данном случае достигается проработка структуры металла труб. Применительно к трубам из коррозионностойких сталей это обеспечивает получение величины аустенитного зерна металла после последующей финишной термической обработки труб не крупнее 6 балла, а также механических свойств металла труб не ниже норм, регламентированных современными действующими техническими условиями. Верхнее значение коэффициента вытяжки за проход λ ограничено упругой и тепловой деформацией разгрузки трубы после волочения, т.е. это значение является границей области определения функций, определяющих оптимальные значения $D_{\text{вол}}$ и

$D_{\text{оп}}$. Поэтому λ назначается не более 1,48, так как эта деформация трубы не выводит размер её внутреннего диаметра за нижнюю границу поля допуска.

Коэффициент вытяжки по стенке трубы $\lambda_s = S_0/S$ назначается не менее $0,90 \lambda$, поскольку в этом случае достигается практически полное «выглаживание» поверхности металла трубы: изменение её топографии и снижение шероховатости, что обеспечивает получение субмикронной чистоты наружной и внутренней поверхностей трубы. Назначение λ_s более $0,94 \lambda$ не целесообразно из-за малого зазора между внутренней поверхностью трубы-заготовки и цилиндрической поверхностью оправки, способствующего нагнетанию смазки в зону, прилегающую к очагу обжатия трубы, и приводящему к раздутию тонкостенной трубы перед входом в волоку и, в итоге, к обрыву трубы.

При изготовлении бесшовных холоднодеформированных особотонкостенных труб из коррозионностойкой стали ЭИ-847 по ТУ 14-159-293-2005 для оболочек ТВЭЛов атомного реактора с размерами: внутренний диаметр 6,6 мм при толщине стенки 0,2 мм и с допусками по внутреннему диаметру $\pm 0,020$ мм по толщине стенки $\pm 0,030$ мм, использовалась трубная заготовка, полученная на ХПТР 8-15 с наружным диаметром $D_0 = 7,480 \dots 7,503$ мм и толщиной стенки $S_0 = 0,250 \dots 0,271$ мм. Для чистового волочильного прохода на закреплённой цилиндрической оправке применялась волока с диаметром калибрующего пояса $D_{\text{вол}} = 7,062$ мм и оправка диаметром $D_{\text{оп}} = 6,629$ мм. Коэффициент вытяжки по сечению трубы составлял $\lambda = 1,329$. В результате получены трубы в диапазоне внутренних диаметров от 6,594 до 6,608 мм, толщин стенок от 0,209 до 0,190 мм. Полученные размеры сечения труб достаточно большой партии полностью укладываются в поля допусков, регламентированные ТУ 14-159-293-2005. Трубы такой точности показывают высокую технологичность при осуществлении реакторных сборок.

Особотонкостенные трубы из стали 06Х16Н15МЗБ-ИД с внутренним диаметром готовой трубы 11,6 мм и толщиной стенки 0,2 мм с такими же допусками как у труб с внутренним диам. $\varnothing 6,6 \times 0,2$ мм, производились короткооправочным волочением с использованием волок диам. $\varnothing 12,096$ мм и оправок диам. $\varnothing 11,647$ мм с коэффициентом вытяжки по сечению $\lambda = 1,365$. Коэффициент вытяжки по стенке составил $\lambda_s = 0,94 \lambda$. После волочения и охлаждения труб внутренний диаметр партии протянутых труб колебался в диапазоне от 11,585 мм до 11,612 мм, а толщина стенки трубы от 0,210 мм до 0,185 мм.

Трубы с такими же готовыми размерами, протянутые из тех же заготовок при совпадении размеров волок и оправок с номинальными размерами готовых труб, все без исключения по диаметру вышли за поле минусового допуска, а по толщине стенки за поле плюсового допуска.

Таким образом, предложенная корректировка размеров инструмента позволила обеспечить более высокую точность особотонкостенных труб. В частности разработана и освоена технология производства прецизионных особотонкостенных труб размерами 5,2X0,20 мм; 9,4X0,20 мм; вн.6,6X0,20 мм; вн.11,6X0,20 мм из стали ЭИ-847 по ТУ 14-159-295-2005. Технология реализована при изготовлении и поставке промышленной партии объемом более 50 тыс. метров труб. Сравнительные результаты оценки точности и стабильности размеров труб, изготовленных по новой и старой технологиям, опубликованы в статье [2].

Улучшение качества обработки внутренней поверхности труб при волочении на закрепленной оправке

Современные [3-5] станы линейного короткооправочного волочения для механизации и автоматизации подачи заготовок труб и оправок снабжаются устройствами барабанного типа, содержащими по два и более трубчатых желоба (контейнера) с жестко закрепленными внутри них на заднем конце стержнями с короткими оправками и выполненное с возможностью осевого перемещения и поворота барабана вокруг оси, параллельной оси волочения, приводы поворота и осевого перемещения барабана. Особенностью конструкций существующих станов является наличие жесткого упора заднего фланца барабана устройства подачи труб и оправок в стойку, закрепленную на фундаменте. После смещения посредством гидро- или пневмоцилиндра барабана с трубчатыми желобами (контейнерами), внутри которых закреплены на заднем конце желобов оправки с надетой трубной заготовкой, в направлении волочения для ввода забитого конца трубы в волоку передние концы желобов не касаются волочильной доски. Поэтому во время волочения силы трения на поверхности оправки создают силу растяжения стержня оправки. Поскольку расстояние между волочильной доской и стойкой, в которую упирается задний фланец барабана подающего устройства, является конструктивным и неизменным параметром волочильного стана, изменение длины стержня оправки невозможно. Если протягивается партия коротких труб, то вынужденно используется оправка полной длины, определяемой размером волочильного стана. Недостатком такой конструкции подающего устройства волочильного стана является низкое качество внутренней поверхности трубы из-за появления дефекта «кольцеватость», появляющегося вследствие продольных автоколебаний стержня оправки [6].

Автоколебания возникают из-за неустойчивого режима подачи смазки на контактную поверхность трубы с оправкой. Коэффициент трения покоя всегда выше, чем при движении из-за выдавливания смазки. В начале волочения сила трения, растягивающая стержень оправки, велика и, следовательно, велика упругая деформация стержня; оправка при этом смещается в направлении волочения по отношению зоны обжатия стенки трубы. После начала волочения смазка нагнетается в зону контакта трубы с оправкой за счет действия так называемого «смазочного клина». В процессе нагнетания смазки коэффициент трения снижается, и сила трения становится меньше силы натяжения оправки. При этом оправка смещается в обратном направлении. Порция смазки высокого давления прорывается вперед через калибрующую часть волоки, формируя кольцевой след на поверхности трубы. Поскольку волочение продолжается, снова возобновляется процесс нагнетания смазки. В итоге возникают устойчивые колебания оправки с частотой ω и достаточно малой амплитудой.

Каждая механическая система характеризуется частотой собственных колебаний. При установке короткой оправки на стержне, жестко закрепленном на заднем торце желоба, колебательный процесс оправки определяется частотой ее собственных колебаний равной

$$p = \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad c^{-1}, \quad \text{где } C - \text{коэффициент жесткости}$$

стержня оправки; m - масса стержня. Коэффициент жесткости определяется выражением

$$c = \frac{SE}{l}, \quad \text{где } S - \text{площадь поперечного сечения}$$

стержня; E - модуль упругости материала стержня; l - длина стержня. Таким образом,

$$\text{частота } P \text{ может быть выражена как } P = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{E}{\gamma}},$$

γ - плотность материала оправки.

Амплитуда продольных колебаний короткой оправки определяется отношением частот ω и P [7]. Если частота возмущающей силы ω мала по сравнению с частотой собственных колебаний стержня P , то амплитуда вынужденных колебаний оправки мало отличается от

$$\text{равновесной амплитуды } A_0 = \frac{P \cdot l}{S \cdot E}, \quad P -$$

продольная сила трения между трубой и оправкой.

При приближении частоты возмущающей силы к частоте собственных колебаний амплитуда колебаний возрастает и при $\omega / P = 1$ становится неограниченно большой (резонансное явление).

Наконец, при частоте возмущающей силы ω больше, чем частота собственных колебаний, амплитуда снова уменьшается, приближаясь к нулю.

Если возмущающая сила (сила натяжения оправки) меняется по гармоническому закону, то резонанс возможен только при совпадении частот $\Omega = P$. Однако, если на механическую систему воздействует периодическая возмущающая сила с периодом колебаний T , то есть $\omega = 2\pi/T$, тогда, как следует из теории негармонических колебаний [6], резонанс наступает не только при $\Omega = P$, но и при $\omega = p/2, p/4, p/6$ и т.д.

В современной практике волочения труб на закрепленной оправке при используемых длинах стержней оправок и скоростях волочения в редких случаях удастся избежать резонансных явлений и появления дефекта внутренней поверхности, называемого «кольцеватость» [6].

С целью устранения этого дефекта и улучшения качества поверхности трубы у стана для волочения труб на закрепленной оправке устройство барабанного типа подачи труб и оправок может быть выполнено с возможностью ввода и упора передних концов трубчатых желобов в расточку волоочильной доски, соосную с волокой.

При жестком упоре трубчатого желоба в расточку волоочильной доски, или волокодержателя, к упругой системе стержня добавляется последовательно присоединенная труба желоба, так же как и стержень нагружаемая в процессе волочения периодически изменяющейся возмущающей силой с амплитудным значением P . Образованная таким образом новая колебательная система стержня оправки и трубчатого желоба имеет иную и существенно отличную от оправки частоту собственных колебаний. В любом случае частота p уменьшается и Ω становится гарантированно большей, чем p , что делает невозможным возникновение резонансных явлений в продольных колебаниях оправки. Чем меньше амплитуда этих колебаний, тем выше качество внутренней поверхности трубы после короткооправочного волочения.

На рисунке представлена конструкция устройства подачи труб и оправок барабанного типа стана для волочения труб на закрепленной оправке.

Волоочильный стан состоит из станины, привода тянущей каретки, тянущей каретки (на чертеже не показаны) с захватом 1 для удержания забитого конца трубы 2, волоочильной доски 3 с установленной в ней волокой 4, а также устройства барабанного типа подачи оправок 5. В состав устройства входят барабан, включающий фланцы 6 и 7 и установленный с возможностью вращения и осевого перемещения вдоль оси 8, жестко закрепленной передним концом в волоочильной доске 3 и задним – в опорной стойке 9. В расточках фланцев закреплено, по меньшей мере, два трубчатых желоба 10, внутри которых коаксиально желобам в заданном осевом положении установлены стержни 11 оправок 5. Задние

резьбовые концы стержней оправок помещены в резьбовые пробки 12. Для фиксации осевого положения стержней с оправками на резьбовых концах стержней установлены контргайки 13. Для осевого перемещения барабана назад между передним фланцем 6 и волоочильной доской 3 на оси 8 установлена пружина сжатия 14, а для перемещения вперед на заднем фланце 7 барабана на оси 8 закреплен коаксиально с ней пневмо- или гидроцилиндр 15, взаимодействующий с плунжером 16, неподвижно закрепленным на оси 8. В волоочильной доске 3 соосно с волокой 4 выполнена расточка для свободного ввода в нее переднего конца трубчатого желоба 10. Для поворота барабана вокруг оси 8 предусмотрен привод поворота любого типа (на чертеже не показан) с элементом фиксации угловых положений трубчатых желобов. Верхнее зафиксированное положение оси трубчатого желоба совпадает с осью механизма подачи трубных заготовок 17 для надевания их на стержень с оправками.

Стан для волочения труб на закрепленной оправке работает следующим образом. В исходном положении тянущая каретка с захватом 1 посредством привода подводится вплотную к волоочильной доске 3. Барабан с трубчатыми желобами 10 под действием пружины 14 отведен в крайнее заднее (левое на чертеже) положение. При этом плунжер 16 упирается в дно цилиндра 15. Оси желобов 10 совпадают соответственно с осью волочения и осью подачи трубных заготовок 17. Заготовка 17 подается вдоль оси и надвигается на стержень 11 с оправкой 5 до упора оправки в забитый конец трубы. Барабан вручную или с помощью привода поворачивается на 180°, при этом забитый конец трубной заготовки становится напротив волоки 4 по ее оси. При подаче давления воздуха или жидкости в полость цилиндра 15 (показано стрелкой на чертеже), барабан смещается вперед (вправо на чертеже) до упора переднего конца трубчатого желоба 10 в расточку волоочильной доски 3. При этом забитый конец трубы через каналы волоки 4 подается в губки зажимного устройства 1 тянущей каретки стана. После включения привода каретка движется вправо, осуществляя волочение трубы; при этом короткая оправка 5 расположена в зоне обжатия волоки 4. Сила трения между трубой 2 и оправкой 4 создает растягивающие напряжения в стержне 11 и сжимающие – в трубчатом желобе 10. Образуется двухмассовая колебательная система, частота собственных колебаний которой гарантированно меньше, чем у оправки и у возбуждающей силы, что предотвращает возникновение резонансных колебаний оправки и обеспечивает повышение качества обработки внутренней поверхности трубы.

Для обеспечения возможности регулирования частоты собственных колебаний двухмассовой системы «стержень оправки – трубчатый желоб» допускается установка дополнительной инерционной массы в виде массивной втулки 18, фиксируемой в определенной позиции по длине желоба с помощью стопора 19. Перемещением инерционной массы 18 вдоль

трубчатого желоба можно менять частоту собственных колебаний системы и устранять резонансные явления, возможные при изменении параметров волочения (скорость, обжатие, смазка, материалы трубы и оправки, длина стержня оправки).

Заключение

Показана возможность получения точных размеров сечения особотонкостенных труб из коррозионностойких сталей рациональной корректировкой размеров традиционного инструмента (оправок и волок), применяемого при короткооправочном волочении. При наличии высокоточного шлифовального оборудования и надежных методик определения размеров инструмента допуски на размеры труб для ТВС атомных реакторов могут быть ужесточены.

Волочение на короткой закрепленной оправке, позволяющее получать наиболее качественную внутреннюю поверхность, в частности, нержавеющей труб и обладающее существенным недостатком – склонностью к генерированию автоколебаний оправки, достаточно просто может быть усовершенствовано изменением конструкции установки барабанного устройства подачи труб и оправок на существующих волочильных станах. Возможность регулирования частоты собственных колебаний механической системы закрепления стержня оправки позволяет добиться гашения колебаний практически при любых технологических параметрах короткооправочного волочения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баканов М.В., Чуев В.В., Крюков О.В. и др. Оптимизация структурного состояния материала оболочечных труб из стали ЧС68 в холоднодеформированном состоянии /Изв.вузов. Ядерная энергетика, 2005, №1. С.139-145.
2. Паршаков С.И., Серебряков А.В., Розенбаум М.М., Серебряков Ан.В. и др. Новая технология получения особотонкостенных труб из коррозионностойкой стали /Сталь, 2007, №5. С.89-93.
3. Когос А.М. Механическое оборудование волочильных и лентопрокатных цехов. М.: Metallurgizdat, 1957. 340 с.
4. Савин Г.А. Волочение труб. М.: Metallurgiya, 1982, 160 с.
5. Машины и агрегаты для обработки цветных металлов и сплавов /В.С.Паршин, В.П.Костров, Б.С.Сомов и др. М.: Metallurgiya, 1988. 400 с.
6. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов /А.В. Зиновьев, А.И. Колпашников, П.И. Полухин и др. М.: Metallurgiya, 1992. 512 с.
7. Расчеты на прочность в машиностроении /С.Д.Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев и др. М.: Машгиз, 1959. Т.3. 1118 с.

References

1. Bakanov M.V., Chuev V.V., Kryukov O.V. i dr. Optimizatsiya strukturnogo sostoyaniya materiala obolocheknykh trub iz stali CHS68 v kholodnodeformirovannom sostoyanii /Izv.vuzov. YAdernaya ehnergetika, 2005, №1. pp.139-145.
2. Parshakov S.I. Serebrjakov A.V. Rozenbaum M.M. Serebrjakov An.V. i dr. Novaja tehnologija poluchenija osobotonkostennykh trub iz korrozionnostojkoj stali /Stal', 2007, №5. pp.89-93.
3. Kogos A.M. Mekhanicheskoe oborudovanie volochil'nykh i lentoprokatnykh tsekhov. M.: Metallurgizdat, 1957. 340 p.
4. Savin G.A. Volochenie trub. M.: Metallurgiya, 1982, 160 p.
5. Mashiny i agregaty dlya obrabotki tsvetnykh metallov i splavov /V.S.Parshin, V.P.Kostrov, B.S.Somov i dr. M.: Metallurgiya, 1988. 400 p.
6. Tekhnologiya obrabotki davleniem tsvetnykh metallov i splavov /A.V. Zinov'ev, A.I. Kolpashnikov, P.I. Polukhin i dr. M.: Metallurgiya, 1992. 512 p.
7. Raschety na prochnost' v mashinostroenii /S.D.Ponomarev, V.L. Biderman, K.K. Likharev i dr. M.: Mashgiz, 1959. Vol.3. 1118 p.

Сведения об авторах

1.Серебряков Андрей Васильевич, начальник отдела НИЦ ОАО ПНТЗ, кандидат технических наук.
623101, г. Первоуральск, ул. Советская, д.20-б, кв. 50
Тел. 89122401032
E-mail: Andrey.Serebryakov@chelpipe.ru

2.Серебряков Александр Васильевич, доцент кафедры обработки металлов давлением Уральского федерального университета, кандидат технических наук, доцент
620072, г.Екатеринбург, ул. Высоцкого, д. 18, кв.197
Тел. 89122429343
E-mail: sav@mtf.ustu.ru

3.Буркин Сергей Павлович, профессор кафедры обработки металлов давлением Уральского федерального университета, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.
620012, г. Екатеринбург, ул. Красных борцов, д. 7, кв. 69
Тел. 89126229908, (343) 375-46-24
E-mail: spb@mtf.ustu.ru

4.Шимов Георгий Викторович, аспирант кафедры обработки металлов давлением Уральского федерального университета
620078, г.Екатеринбург, ул. Малышева, д.132, кв. 52
Тел. 89022795904
E-mail: spb@mtf.ustu.ru

1.Serebryakov Andrey V., Head of Research Center of PNTZ, candidate of technical sciences.
623101, Pervouralsk, Soviet Str. 20-b, apt. 50
Tel. 89122401032
E-mail: Andrey.Serebryakov @ chelpipe.ru

2.Serebryakov Alexander V., assistant professor of Metal Forming of the Ural Federal University, Ph.D., Associate Professor
620072, Ekaterinburg, Vysotsky str., 18, apt.197
Tel. 89122429343
E-mail: sav@mtf.ustu.ru

3.Burkin Sergei P., professor of Metal Forming of the Ural Federal University, Ph.D., Senior Research Fellow.
620012, Ekaterinburg, Krasnykh bortsov str., 7, apt. 69
Tel. 89126229908, (343) 375-46-24
E-mail: spb@mtf.ustu.ru

4.Shimov George V., graduate student, Department of Metal Forming of the Ural Federal University
620078, Ekaterinburg, Malyshev str., 132, apt. 52
Tel. 89022795904
E-mail: spb@mtf.ustu.ru