МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.774.353

Поступила 08.11.2016

ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВАЛКОВОГО ОБЖАТИЯ КОНЦЕВЫХ УЧАСТКОВ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ

POWER PARAMETERS OF THE PROCESS OF END FORMING OF THICK WALLED TUBES

В. А. ТОМИЛО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. Email: stamila@rambler.ru

V. A. TAMILA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. Email: stamila@rambler.ru

Произведен расчет усилия, действующего на валки в радиальном направлении, аналитическим способом и с применением методов компьютерного моделирования. Расчет процесса обжима концов трубных заготовок с применением МКЭ позволил получить распределение энергосиловых параметров по времени. Отклонение экспериментальных данных от результатов аналитического расчета находится в пределах 3%.

Analysis of forces acting on the rolls in the radial direction made by the analytical method and with use of computer modeling techniques is made. Application of FEM has allowed to calculate distribution of power parameters of the technological process during time. The deviation of the experimental data on the results of analytical calculation is within 3%.

Ключевые слова. *Трубчатая заготовка, обжатие, переменный профиль, прокатка, энергосиловые параметры, метод конечных элементов.*

Keywords. *Tube blank, drafting, variable profile, rolling, power parameters, finite-element method.*

Введение

Трубные заготовки переменного сечения в современном машиностроении находят самое широкое применение. Согласно ГОСТ 8734 [1], в зависимости от отношения наружного диаметра $D_н$ к толщине стенки S трубы подразделяются на особотонкостенные ($D_н/S > 40$ и трубы диаметром 20 мм и менее со стенкой 0,5 мм и менее); тонкостенные ($12{,}5 < D_н/S < 40$ и трубы диаметром 20 мм и менее со стенкой 1,5 мм); толстостенные ($6 < D_н/S < 12{,}5$); особотолстостенные ($D_н/S < 6$).

Наиболее распространенным типом толстостенных трубных заготовок переменного профиля являются трубная заготовка с обжатым концом с одной стороны – цапфа или с обоих концов – ось (рис. 1).

Основными видами нагрузок на детали толстостенного трубного сечения являются изгиб, кручение и совместное действие изгиба и кручения. Использование в конструкции заготовки трубного сечения позволяет добиться уменьшения расхода металла и облегчения веса. Другое важное свойство полых деталей – они менее чувствительны к концентрации напряжений при циклических нагрузках, в особенности при упрочнении ППД, так как возникающие в них остаточные напряжения смещаются ближе к поверхности и превосходят по величине остаточные напряжения, возникающие в сплошных деталях того

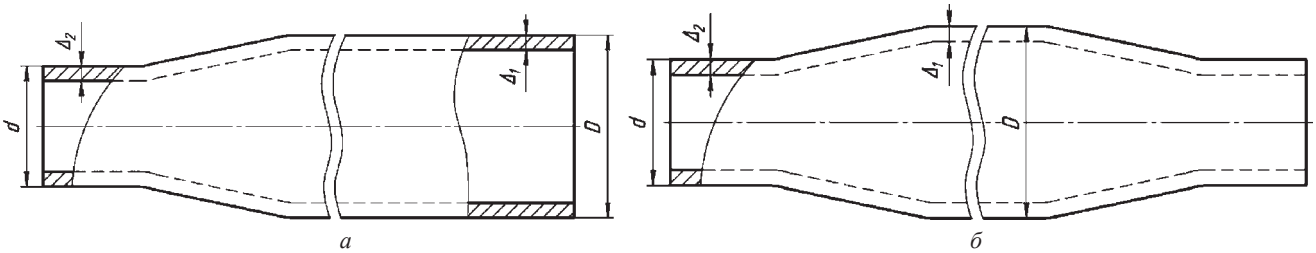


Рис. 1. Трубные заготовки с обжатым одним концом (цапфа) (*а*) и двумя концами (ось) (*б*)

же диаметра. Таким образом, наличие в полой детали продольного отверстия изменяет напряженное состояние детали и обеспечивает высокие эксплуатационные качества [2].

При этом основными качественными характеристиками данного типа заготовок являются отношения d/D и Δ_2/Δ_1. Первое отношение (коэффициент обжима) характеризует степень обжатия заготовки при формообразовании и зависит от конструкции конечной детали и возможностей технологии и оборудования. Второе отношение характеризует степень текучести металла при обжатии и зависит в первую очередь от состояния материала и особенностей технологии и оборудования.

Для обжима толстостенных трубных заготовок в настоящее время разработан и применяется ряд технологий, которые можно условно разделить на две группы. К первой группе можно отнести технологии, которые основаны на применении серийно выпускаемого кузнечно-прессового оборудования (обжим в штампах, обжим с применением ротационных машин и т. д.) [3]. Ко второй группе следует отнести технологии, основанные на применении оригинальных способов формообразования (поперечно-клиновая или поперечно-винтовая прокатка, прокатка в профилированных валках и т. д.).

Конструкция и работа автоматизированного комплекса для точного формообразования наружных поверхностей переменного профиля

Экспериментальные исследования проводили на установке обжима концевых участков толстостенных труб. В качестве образцов применяли трубчатые заготовки. Внешний диаметр – 121 мм, внутренний – 85 мм, длина заготовок варьировалась. Материал заготовок – Сталь 40Х ГОСТ 4543-71 и технический свинец.

Схема установки и внешний вид показаны на рис. 2, *а*, *б*.

Комплекс работает следующим образом. Детали укладываются в механизм загрузки *1*, который при работе поштучно выдает заготовки манипулятору, находящемуся в позиции загрузки. Затем заготовку манипулятором перемещают на позицию нагрева и подают в индуктор *2*, где происходит ее нагрев до ковочной температуры от генератора ТВЧ *3*. Длина нагреваемой части заготовки 270–300 мм. Далее заготовку извлекают из индуктора и укладывают манипулятором на направляющую. На направляющей толкатель, установленный согласно длине детали, перемещает заготовку к прокатной клети *4*. Прокатная клеть представляет собой две плиты, между которыми через 120° располагаются барабаны с установленными в них корпусами валков. Корпуса валков имеют возможность поворота вокруг своей оси для изменения угла подачи. Привод осуществляется от электродвигателя через цепную передачу и механизм винт–гайка. Межвалковый зазор регулируется нажимными винтами с контргайками. Вращающиеся валки за счет отличного от нуля угла подачи производят захват заготовки и обжим, в процессе которого заготовка вращается и перемещается вдоль своей оси. При достижении обжатой частью заготовки необходимой длины происходит автоматическое изменение угла подачи в область отрицательных значений, что позволяет вывести поковку из межвалкового зазора и получить калиброванный переходный конусный участок между обжатой и необжатой частями поковки. После обжима заготовку выводят из клети выталкивателем, установленным на выходной стороне клети, и манипулятором перемещают к механизму сброса.

Технические характеристики комплекса приведены ниже.

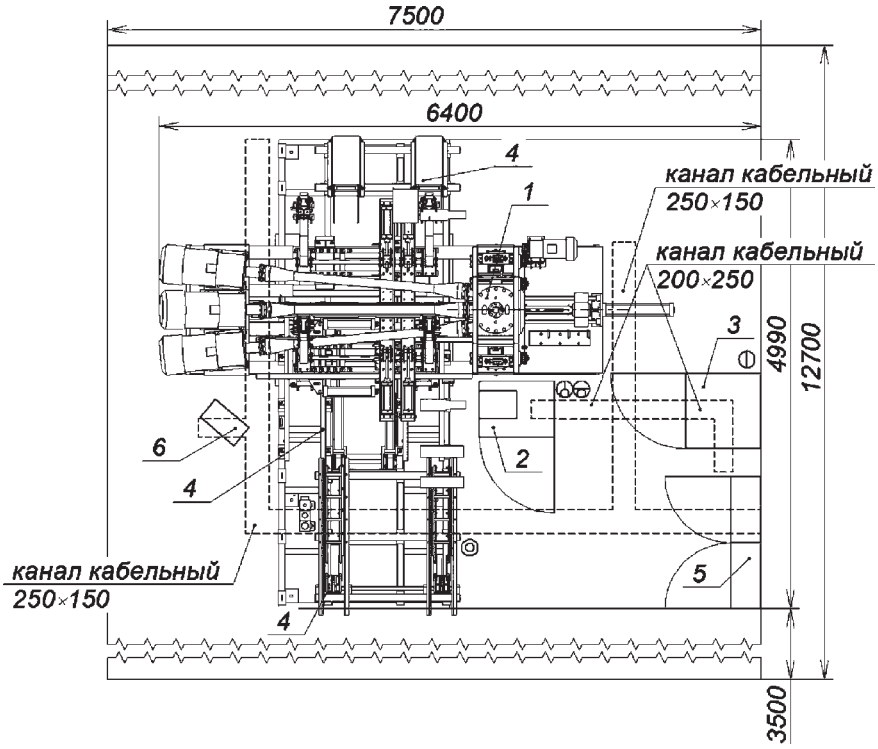
Мощность привода валка, кВт	11
Количество валков	3
Диаметр валка в точке пережима, мм	300
Частота вращения валков, об/мин	20
Угол раскатки, град	6
Угол подачи, град	Регулируется от –10 до +10

Энергосиловые параметры

Определение необходимых момента и усилия начинается с нахождения площади контактной поверхности между валком и заготовкой.

Ширину контактной поверхности рассчитывали по уравнению, полученному А. И. Целиковым [4]:

$$b_x = \sqrt{\frac{D_x[\Delta r_x d_x + 2(\Delta r_x)^2]}{D_x + d_x + 2\Delta r_x}}, \quad (1)$$



а

б

Рис. 2. Автоматизированный комплекс для точного формообразования наружных поверхностей переменного профиля: *а* – *1* – средства механизации (механизм загрузки, манипуляторы, механизм сброса); *2* – индукционный нагреватель; *3* – ТВЧ генератор; *4* – клеть прокатная; *5* – система управления; *6* – пульт управления (рабочее место оператора); *б* – внешний вид

где D_x – диаметр валка в заданном сечении: $D_x = D_0 + 2l_x \operatorname{tg}\alpha$ (D_0 – диаметр цилиндрической части валка; l_x – расстояние от входа в очаг деформации до заданного сечения; α – угол конусности поверхности валка); Δr_x – уменьшение радиуса валка за 1/3 оборота (частное обжатие); d_x – диаметр заготовки в заданном сечении: $d_x = d_0 + 2l_x \operatorname{tg}\alpha$ (d_0 – диаметр исходной заготовки).

В процессе поперечно-винтовой прокатки поверхности валков вследствие своей конусности по ходу прокатки сближаются. За 1/3 оборота величина сближения найдена по уравнению:

$$\Delta r_x = \frac{\pi}{2} d_x \frac{A_{1x}}{A_x} \frac{D_1}{D_x} \frac{\eta_o}{\eta_T} \xi \operatorname{tg}\gamma \operatorname{tg}\alpha, \qquad (2)$$

где A_{1x}, A_x – соответственно площадь поперечного сечения заготовки с учетом и без учета внутренней полости; D_1 – диаметр валка в зоне пережима; η_o – коэффициент скольжения заготовки по поверхности валка в осевом направлении; η_T – коэффициент скольжения заготовки по поверхности валка в танген-

циальном направлении (в практических расчетах принимается 0,96–0,98); ξ – коэффициент овальности (принимается 1,018–1,104); γ – угол между осью валка и осью заготовки.

Площадь поперечного сечения заготовки без учета внутренней полости:

$$A_x = d_x^2 \frac{\pi}{4}.$$

Площадь поперечного сечения заготовки с учетом внутренней полости:

$$A_{1x} = \left(d_x^2 - d_1'^2\right)\frac{\pi}{4},$$

где d_1' – диаметр внутренней полости заготовки в заданном сечении.

Площадь контактной поверхности:

$$A_d = \sum \frac{b_x + b_{x+1}}{2}\Delta l,$$

где Δl – длина рассматриваемого участка очага деформации.

При поперечной прокатке, как и при винтовой, истечение металла происходит в осевом и тангенциальном направлениях заготовки. Однако при выводе формулы для определения величины *b* предполагалось, что истечение металла происходит только в направлении оси заготовки.

Такой характер истечения металла возможен при прокатке узких шайб в валках с гладкой бочкой. При прокатке в условиях, где заготовка имеет длину, соизмеримую с ее диаметром, только часть металла смещается в осевом направлении. Другая часть металла смещается в тангенциальном направлении заготовки и идет на овализацию или уширение последней.

Промежуточные результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. **Промежуточные результаты расчетов и исходные данные**

d_x, мм	A_x, мм^2	d'_1, мм	A_{1x}, мм^2	D_1, мм	D_x, мм	η_o	η_T	ξ	γ, град	α, град	Δr_x, мм	b_x, мм
121	11499	82,98	6091,01	300	266	0,77	0,97	1,1	5	18,78	2,9642	15,96
114,2	10242,9	76,18	5684,91		272,8						2,8582	15,43
107,4	9059,38	69,38	5278,8		279,6						2,7534	14,88
100,6	7948,51	62,58	4872,69		286,4						2,6449	14,31
93,8	6910,28	55,78	4466,58		293,2						2,5438	13,72
87,83	6058,65	51,51	3974,77		299,17						2,3694	12,94
87	5944,68	51	3901,86		300						2,3416	12,82

По мере того, как число 1/3 оборотов заготовки растет, фактическая величина частного обжатия Δr все больше увеличивается по сравнению с теоретической. В результате возрастает и фактическая ширина контактной поверхности металла с валком. Для компенсации данной погрешности в уравнение (2) введен коэффициент овальности ξ.

На прокатываемую заготовку действует усилие *F* со стороны верхнего валка. Соответственно на валок действует такое же усилие в обратном направлении. Усилие прокатки направлено под углом φ к вертикальной оси и проходит через ось прокатываемой заготовки (рис. 3).

Для определения давления на валки предварительно были определены следующие величины: средняя вытяжка $\lambda = A_0/A_2$ (A_0, A_2 – соответственно площади поперечного сечения исходной и полученной заготовки); среднее обжатие $\varepsilon = 1 - 1/\lambda$; величина $\delta = \mu\sqrt{2D/\Delta h}$ (μ – коэффициент трения по уравнению Экелунда); *D* – средний диаметр валка в очаге деформации: $D = (D_0 + D_1)/2$ (D_0, D_1 – соответственно диаметр цилиндрической части валка и диаметр валка в зоне пережима); Δh – расчетная величина, определяемая согласно уравнению: $\Delta h = h\varepsilon$ (*h* – высота контактной поверхности в очаге деформации: $h = A_0 / d_0$).

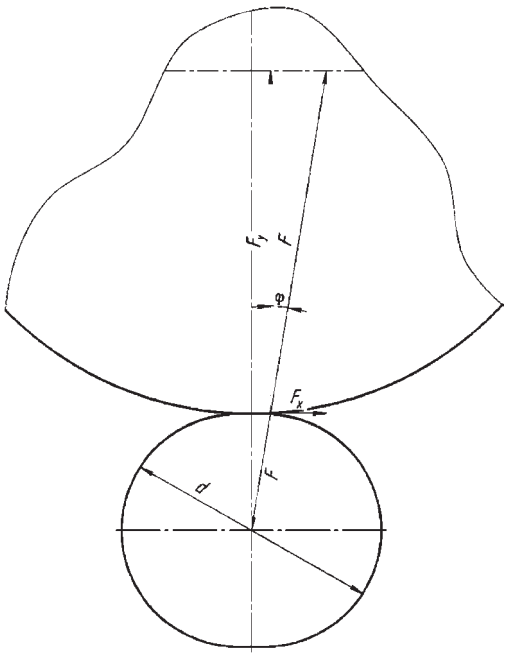


Рис. 3. Схема направления усилия, действующего на валок со стороны заготовки

Исходя из значений среднего обжатия ε и величины δ по номограмме определено значение отношения среднего давления к среднему сопротивлению деформации $k_w / 1{,}15k_f = 1{,}25$.

Среднее сопротивление деформации вычислено по уравнению:

$$k_f = k_{f0} k_\varphi k_{\dot\varphi} k_v,$$

где k_{f0} – начальное сопротивление деформации; k_φ, $k_{\dot\varphi}$, k_v – термодинамические коэффициенты, учитывающие влияние степени деформации, скорости деформации и температуры протекания процесса соответственно.

Усилие F, действующее на валок, вычислено по уравнению:

$$F = k_w A_d,$$

$$F = 103{,}701 \cdot 792{,}295 = 82161{,}78 \text{ Н} = 82{,}2 \text{ кН}.$$

Если пренебречь относительно малым моментом, вызываемым горизонтальной силой (рис. 3), то момент прокатки можно определить по уравнению:

$$M_d = Fa,$$

где a – плечо приложения силы.

Согласно А. И. Целикову, плечо приложения силы может быть найдено по приближенному уравнению [4]:

$$a = \frac{D+d}{2}\frac{b_m}{d},$$

где d – средний диаметр заготовки в очаге деформации: $d = (d_0 + d_1)/2$ (d_0, d_1 – соответственно диаметр исходной заготовки и диаметр полученной заготовки); b_m – определен по уравнению: $b_m = A_d / l_d$ (l_d – длина очага деформации: $l_d = \sqrt{D\Delta h / 2}$).

Для осуществления процесса необходима мощность (без учета трения в опорных шейках валков), вычисляемая по уравнению:

$$P = M_d \frac{\pi n}{30}.$$

Для получения не только предельных значений параметров, но и их распределения во времени, произведен численный расчет обжима концевых участков толстостенных труб с применением метода конечных элементов (МКЭ).

Схема валкового обжима приведена на рис. 4. Три приводных валка равномерно расположены вокруг оси прокатки. Наклон осей валков на угол подачи α по отношению к оси прокатки способствует перемещению заготовки вдоль оси прокатки при вращении валков. В расчетной модели добавлены направляющая и толкатель. Направляющая препятствует уходу заготовки с оси прокатки, а толкатель предназначен для перемещения заготовки к валкам до формирования устойчивого контакта и захвата заготовки валками. В модели валки приняты абсолютно жесткими телами, учтен теплообмен заготовки с валками и окружающей средой. Трение и теплообмен с направляющей и толкателем не учитываются. Остальные параметры процесса приведены в табл. 2.

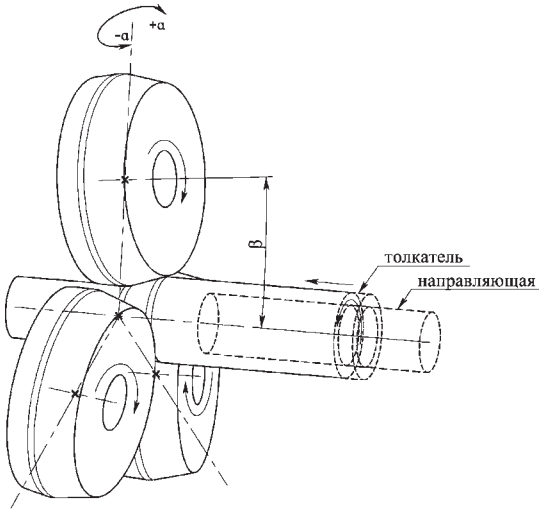


Рис. 4. Схема валкового обжима

Таблица 2. **Параметры процесса обжима**

Начальная температура заготовки, °С	1250
Температура прокатных валков, °С	150
Материал заготовки	Сталь 40Х
Скорость вращения валков, об/мин	20
Скорость перемещения толкателя, мм/с	1
Коэффициент трения между заготовкой и инструментом	0,7

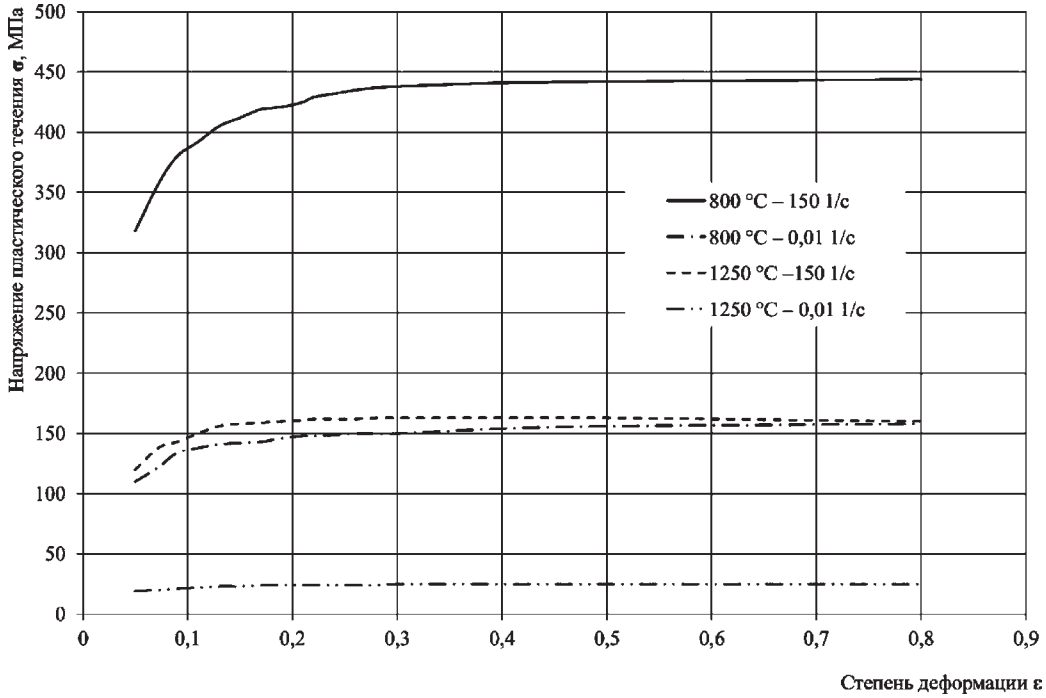


Рис. 5. Свойства стали 40Х

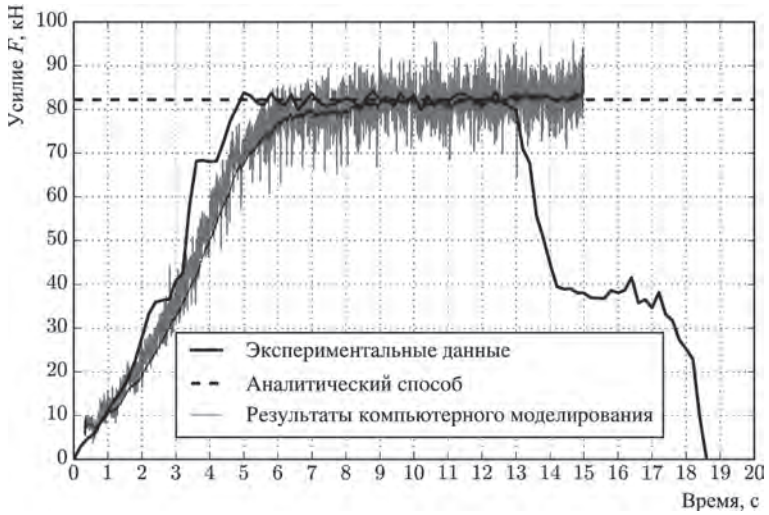


Рис. 6. Зависимость усилия прокатки от времени

Заготовка разбита на восьмигранные конечные элементы. Зависимость σ–ε для стали 40Х приведена на рис. 5.

Построенная модель применена для моделирования валкового обжима, параметры проведения которого приведены в табл. 2. В результате расчета получены зависимости усилия и момента прокатки от времени.

Зависимость усилия прокатки от времени показана на рис. 6, зависимость момента прокатки от времени – на рис. 7.

На рисунках серым цветом показаны данные, полученные при расчете методом конечных элементов. В данном виде зависимость представляет собой временной ряд с краткосрочными колебаниями. Колебания кривой на графиках объясняются изменением площади контакта заготовки с валками в процессе расчета. Для сглаживания кривых они были подвергнуты обработке, черным цветом показаны кривые после обработки, представляющие собой скользящее среднее по десяти точкам. Пунктирная линия показывает значения усилия и момента прокатки, полученные при аналитических расчетах. Отклонение результатов моделирования от результатов аналитических расчетов находится в пределах 4% для усилия прокатки и 15% для момента прокатки. Высокое отклонение в случае момента прокатки вызвано, видимо, погрешностью при определении геометрических параметров очага деформации, а следовательно, и плеча приложения силы при аналитических расчетах.

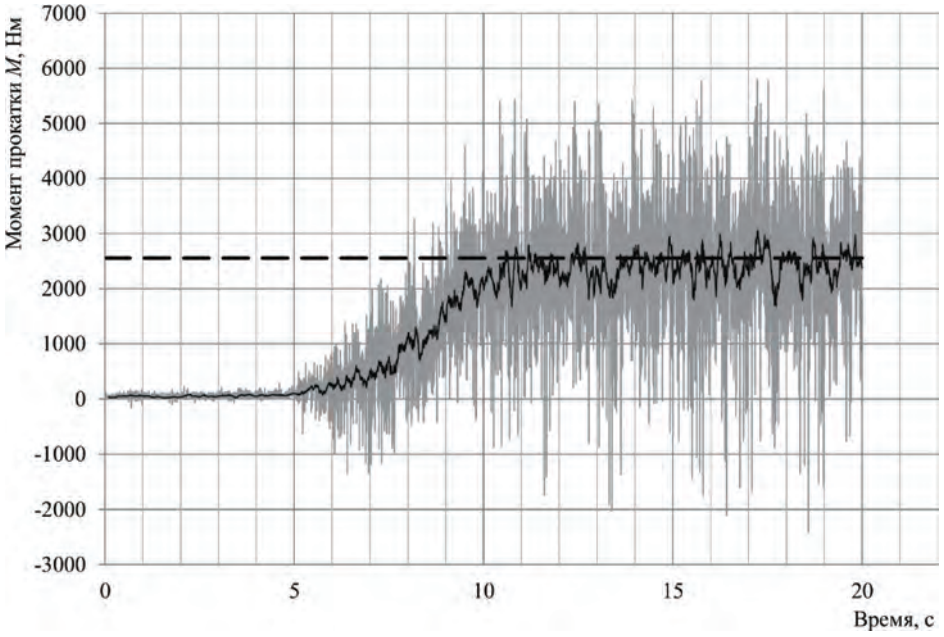


Рис. 7. Зависимость момента прокатки от времени

На рис. 6 также приведена зависимость, полученная в ходе проведения эксперимента. При установившемся процессе отклонение усилия от значений, полученных в ходе расчетов, находится в пределах 3%. Затем происходит резкое падение усилия, соответствующее реверсу валков. Выталкивание заготовки из межвалкового зазора происходит при усилии 40 кН.

Выводы

Произведен расчет усилия, действующего на валки в радиальном направлении, аналитическим способом и с применением методов компьютерного моделирования. Расчет процесса обжима концов трубных заготовок с применением МКЭ позволил получить распределение энергосиловых параметров по времени. Отклонение данных математического моделирования от данных аналитического расчета находится в пределах 4% для усилия и 15% для момента прокатки. Отклонение экспериментальных данных от результатов аналитического расчета находится в пределах 3%.

Соответствие результатов моделирования экспериментальным данным позволяет говорить об адекватности построенной модели, которая может использоваться для проведения исследований с различными входными данными с целью получения энергосиловых, кинематических и других параметров, а также напряженно-деформированного состояния.

Литература

1. **Трубы** стальные бесшовные холоднодеформированные. Сортамент: ГОСТ 8734-75. М.: Стандартинформ, 2007. 12 с.

2. **Полые** оси и валы / Л. М. Школьник [и др.]. М.: Машиностроение, 1968. 183 с.

3. **Технологии** изготовления и обработки специальных периодических профилей / В. В. Клубович, В. А. Томило. Минск: БНТУ, 2007. 298 с.

4. **Расчет** энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справ. изд. / А. Хензель, Т. Шпиттель; пер. с нем. М.: Металлургия, 1982. 360 с.

References

1. ***Truby*** *stal'nye besshovnye holodnodeformirovannye. Sortament* [State Standard 8734–75. Seamless steel tubes cold deformed. Range]. GOST 8734-75.. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 12 p.

2. **Shkol'nik L. M. i dr.** *Polye osi i valy* [Hollow axles and shafts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 183 p.

3. **Klubovich V. V., Tomilo V. A.** *Tehnologii izgotovlenija i obrabotki special'nyh periodicheskih profilej* [Technology of production and processing of special periodic profiles]. Minsk, BNTU Publ., 2007. 298 p.

4. **Henzel' A., Shpittel' T.** *Raschet jenergosilovyh parametrov* v *processah obrabotki metallov davleniem: Sprav. izd.* [Calculation of power parameters in metal forming processes: Ref. ed.]. Moscow, Metallurgija Publ., 1982. 360 p.