

УДК 621.778.28: 621.774.6

Завгородний А. В.
Грибков Э. П.**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРАВКИ ТРУБ НА КОСОВАЛКОВЫХ ТРУБОПРАВИЛЬНЫХ МАШИНАХ**

В последние годы наметилась тенденция по более быстрому развитию производства труб по сравнению с другими отраслями черной металлургии. При этом развитие мирового производства труб характеризуется не только количественным ростом, но также и существенными качественными изменениями. Из года в год растет число труб, производимых из легированных сталей, при этом особое внимание уделяется трубам из нержавеющей и жаростойких сталей, а также трубам с повышенной прочностью [1]. Дальнейшее повышение требований к уровню потребительских свойств, характеризуемых соотношением «сортамент-цена-качество», свидетельствует о целесообразности проведения широкого круга дальнейших исследований, направленных на развитие методов расчета и автоматизированного проектирования, разработку конкретных практических рекомендаций и, как следствие, на повышение технико-экономических показателей процессов правки трубного металлопроката.

Несмотря на успехи отечественной науки в области теории и практики правки труб и опережение по многим вопросам зарубежных производителей правильного оборудования, основными из которых являются Bronx/Taylor Wilson (США-Великобритания) и Kieserling (Германия), существуют еще вопросы, решение которых существенно повысит конкурентоспособность отечественных трубоправильных машин на мировом рынке отделочного оборудования.

Целью работы является повышение уровня конкурентоспособности оборудования для правки труб на основе уточнения методов их расчета и проектирования.

В настоящее время наиболее рациональным методом решения прикладных задач теории ОМД, а также прочностных расчетов [2–5] считается метод конечных элементов.

В качестве программного продукта, использующего метод конечных элементов при решении различного рода задач, было принято решение использовать Abaqus CAE – как универсальную программу общего назначения, предназначенную для проведения многоцелевого инженерного многодисциплинарного прочностного анализа поведения сложных конструкций [6].

Для решения поставленной в работе цели, на основе численных конечно-элементных подходов, были уточнены и расширены в объеме предоставляемой информации математические модели напряженно-деформированного состояния металла при правке труб и трубных заготовок на правильных косовалковых машинах. Рассматриваемая применительно к анализу процесса правки труб на правильных косовалковых машинах расчетная схема представлена на рис. 1.

При моделировании производили дискретизацию объема (построение конечно-элементной сетки), занимаемого моделью, на элементарные области (конечные элементы) (см. рис 1, б). Для моделирования валков были использованы трехмерные четырехузловые недеформируемые элементы типа R3D4 [7]. Для моделирования трубы были использованы элементы типа S4R [7] – четырех узловые, прямоугольные элементы оболочки с контролем разрушения.

Данные расчеты были выполнены применительно к правильной косовалковой машине РВВ 1500×3. В соответствии с этим шаг машины t был принят 1500 мм (рис. 1, а), диаметр валков в горловине $D_2 = 600$ мм, длина валка $L_B = 900$ мм (рис. 2, а).

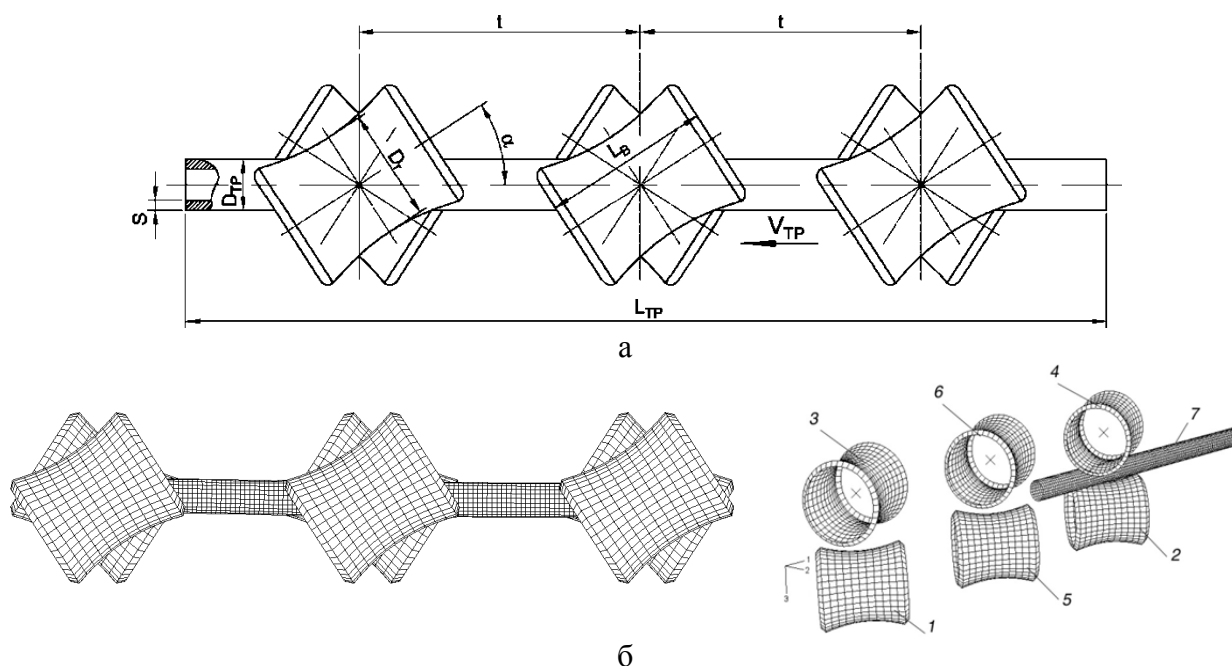


Рис. 1. Расчетная (а) и конечно-элементная (б) модели процесса правки труб на правильных косовалковых машинах, выполненная применительно к шестивалковой трубоправильной машине



Рис. 2. Профиль валка и его конечно-элементная модель применительно к процессу правки труб на косовалковых трубоправильных машинах

Профилировка валков и определение угла установки валков осуществлялись по известным методикам [8]. Непосредственно моделирование процесса правки было выполнено для трубы наружным диаметром и толщиной стенки $D = 273$ мм, $S = 8; 15; 20$ мм и $D = 420$ мм, $S = 10; 20; 30$ мм соответственно. Исходная конечно-элементная модель имела следующие граничные условия: крайние нижние валки 1 и 2 (рис. 1, б) имеют одну вращательную степень свободы, валки 3, 4 имеют вращательную степень свободы и возможность перемещения по оси «3» глобальной системы координат для осуществления настройки модели на заданный диаметр трубы. Валки среднего калибра 5 и 6 имеют по две степени свободы, возможность вращения вокруг своей оси, а также перемещения по оси «3». При расчетах была принята изотропная упругопластическая модель (рис. 3, а) материала трубы с учетом упрочнения [9] (сопротивление деформации 410 МПа), кривая упрочнения которого представлена на рис. 3, б.

Контакт между трубой и валками задавался при помощи модели контакта «Поверхность к поверхности» путем задания коэффициента трения $\mu = 0.3$ используя «classical isotropic Coulomb friction model». Моделирование правильных валков (рис. 2) осуществляли в виде недеформируемой поверхности вращения, полученной путем вращения кривой расчетного профиля вокруг оси валка.

Процесс моделирования правки труб и трубных заготовок на правильной косовалковой машине осуществлялся в два этапа. На первом, начальном, шаге к системе применялись граничные условия, описанные выше. Затем, контрольным точкам валков 3, 4 и

6 задавалось перемещение по оси «3» глобальной системы координат для настройки модели на данный диаметр трубы, а контрольной точке валка 5 задавалось перемещение по оси «3» для создания прогиба средней парой валков. После этого, все шесть валков приводились во вращение с угловой скоростью 1,57 рад/сек, что, с учетом диаметра горловины валка, соответствует примерной скорости движения трубы вдоль оси «1» глобальной системы координат 0,3 м/с. Время шага было принято 30 сек.

Для оценки полученных результатов выходными в данном случае параметрами были выбраны проекции реакций в контрольных точках валков в глобальной системе координат $RF1, RF2, RF3$, а также перемещения, деформации и напряжения в узлах конечных элементов трубы.

Анализ полученных в этом случае результатов показал, что максимальная сила правки действует на средний верхний валок. Это объясняется тем, что правка осуществляется смещением средней обоймы валков вниз, т.е. по схеме «прогибом вниз». Силы правки, действующие нижние опорные валки 1 и 2 (рис. 1, б) составляют приблизительно 70...75% от максимальной силы правки (рис. 4).

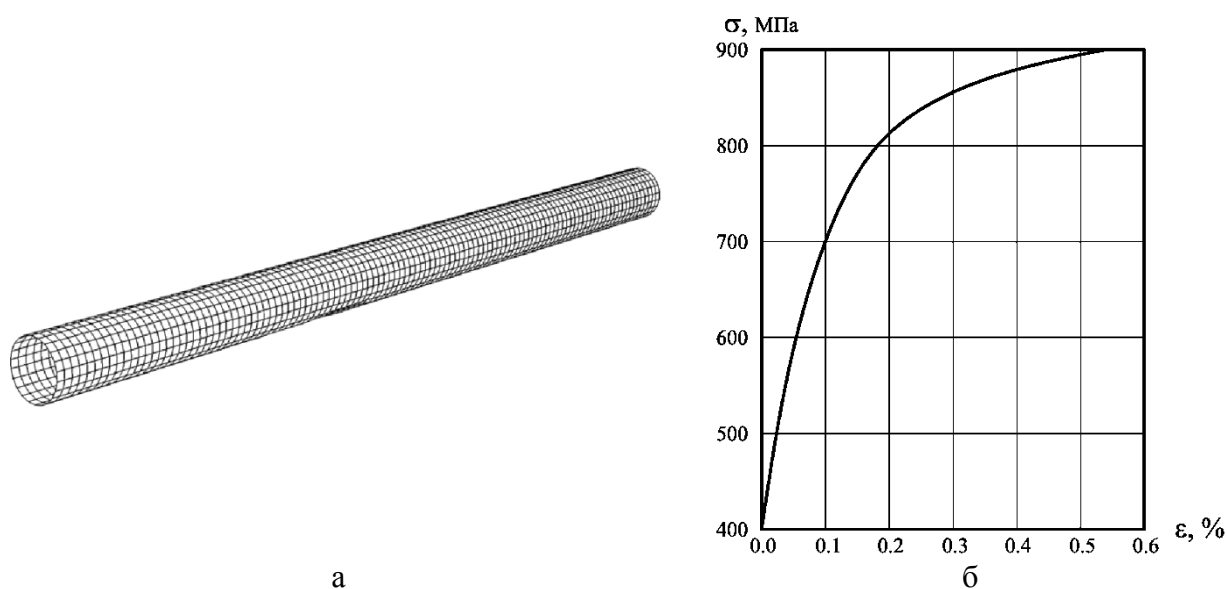


Рис. 3. Конечно-элементная модель трубы, подвергаемой правке (а), и кривая упрочнения для материала трубы (б) при моделировании процесса правки труб на правильных косовалковых машинах [9]

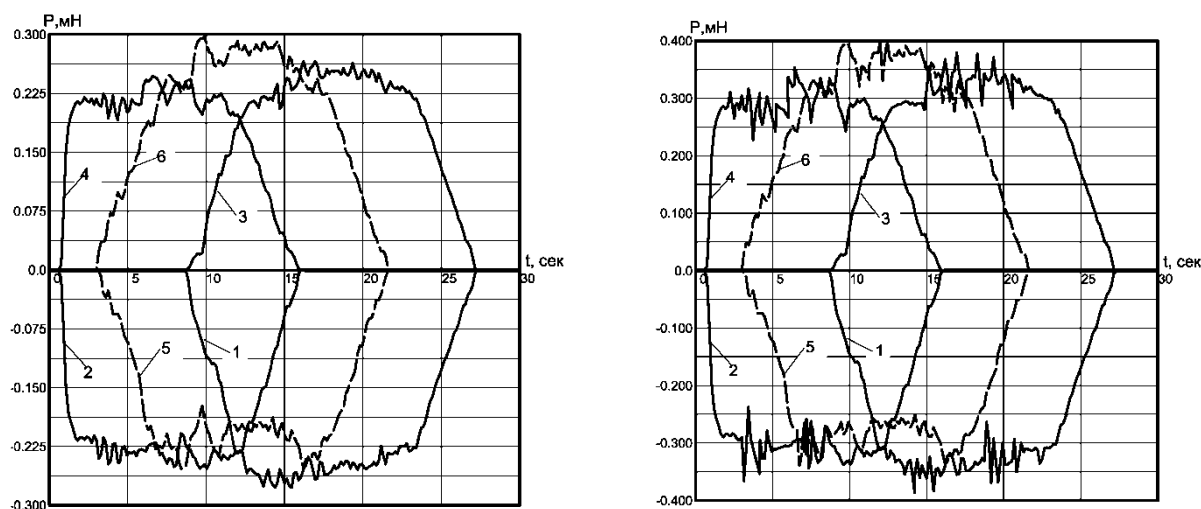


Рис. 4. Расчетные зависимости изменения силы правки от времени шага расчета применительно к реализации процесса правки труб на косовалковых трубоправильных машинах

Распределения эквивалентных напряжений и деформаций представлены в графической форме в виде объемной деформированной модели (рис. 5).

Результаты численной реализации свидетельствуют о достаточно сложном характере напряженного состояния, что подтверждает необходимость создания адекватных расчетных моделей, а также использование метода конечных элементов.

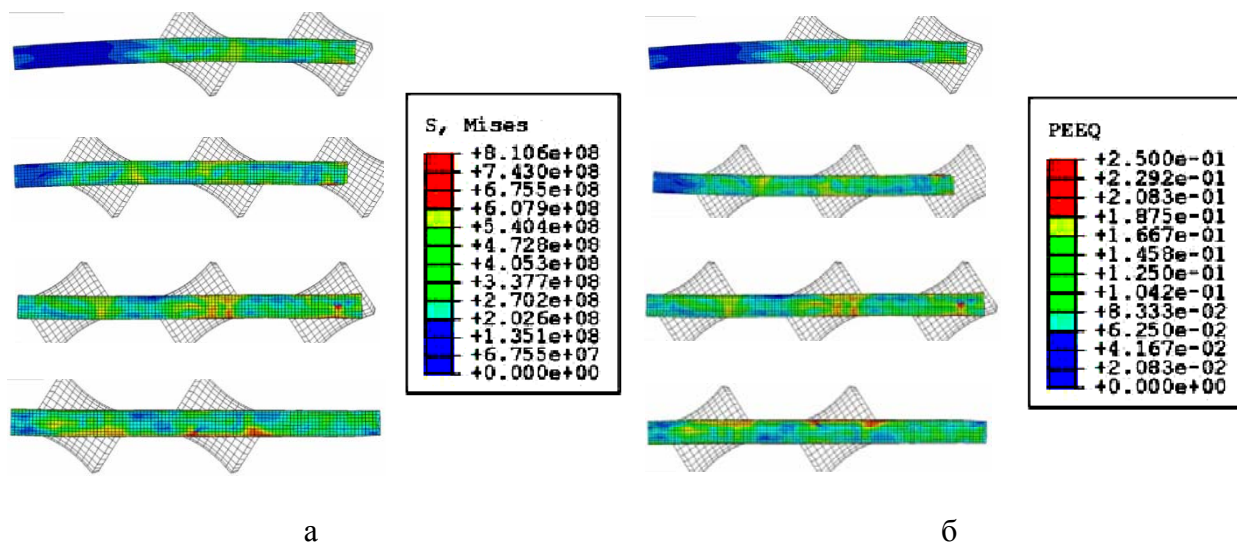


Рис. 5. Расчетные распределения эквивалентных напряжений (а) и деформаций (б) трубы при реализации процесса правки труб на косо валковых трубоправильных машинах

Вторым шагом на пути к вышепоставленной цели является полноценное исследование и совершенствование технологических схем правки. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования показали, что для определенного сортамента труб при правке имеет место оваллизация поперечного сечения трубы, что в недостаточной степени описано в существующих методиках расчета [4–5, 10–13]. Данное явление можно объяснить тем, что при создании прогиба необходимого для исправления продольной кривизны трубы, под валком образуются усилия, превышающие усилия, необходимые для оваллизации поперечного сечения пустотелого изделия. В других же случаях, оваллизацию трубы используют в целях корректировки величины прогиба рабочих валков трубоправильной машины, дорабатывая недостающий прогиб принудительным обжатием трубы. Однако в том или ином случае, разрабатывая технологическую схему правки трубы определенного типоразмера, необходимо в обязательном порядке проверить данную трубу на устойчивость сечения к оваллизации. В качестве примера результатов расчета на рис. 6 приведены расчетные распределения эквивалентных напряжений по сечению трубы (рис. 6, а–д), а также усилие оваллизации (рис. 6, е) в зависимости от ее обжатия валками. Моделированию подвергалась труба диаметром $D=325$ мм и толщиной стенки $S=31,8$ мм, величина обжатия трубы варьировалась от 1 до 8 мм.

Как видно из результатов расчета, в процессе деформации трубы ее сечение сначала сопротивляется до определенного момента, усилие оваллизации растет (см. рис. 6, е), а затем напряжения по оси, перпендикулярной оси правки, повышаются до напряжения текучести (см. рис. 6, а–д), усилие перестает расти и сечение окончательно теряет свою форму.

Проведенное исследование позволяет определиться с граничными условиями наведения оваллизации сечения труб под воздействием усилий на валках правильной машины, и применительно к практическому использованию, определить границы, при которых возникают неравномерные напряжения и потеря круглости в сечении труб при правке чистым изгибом.

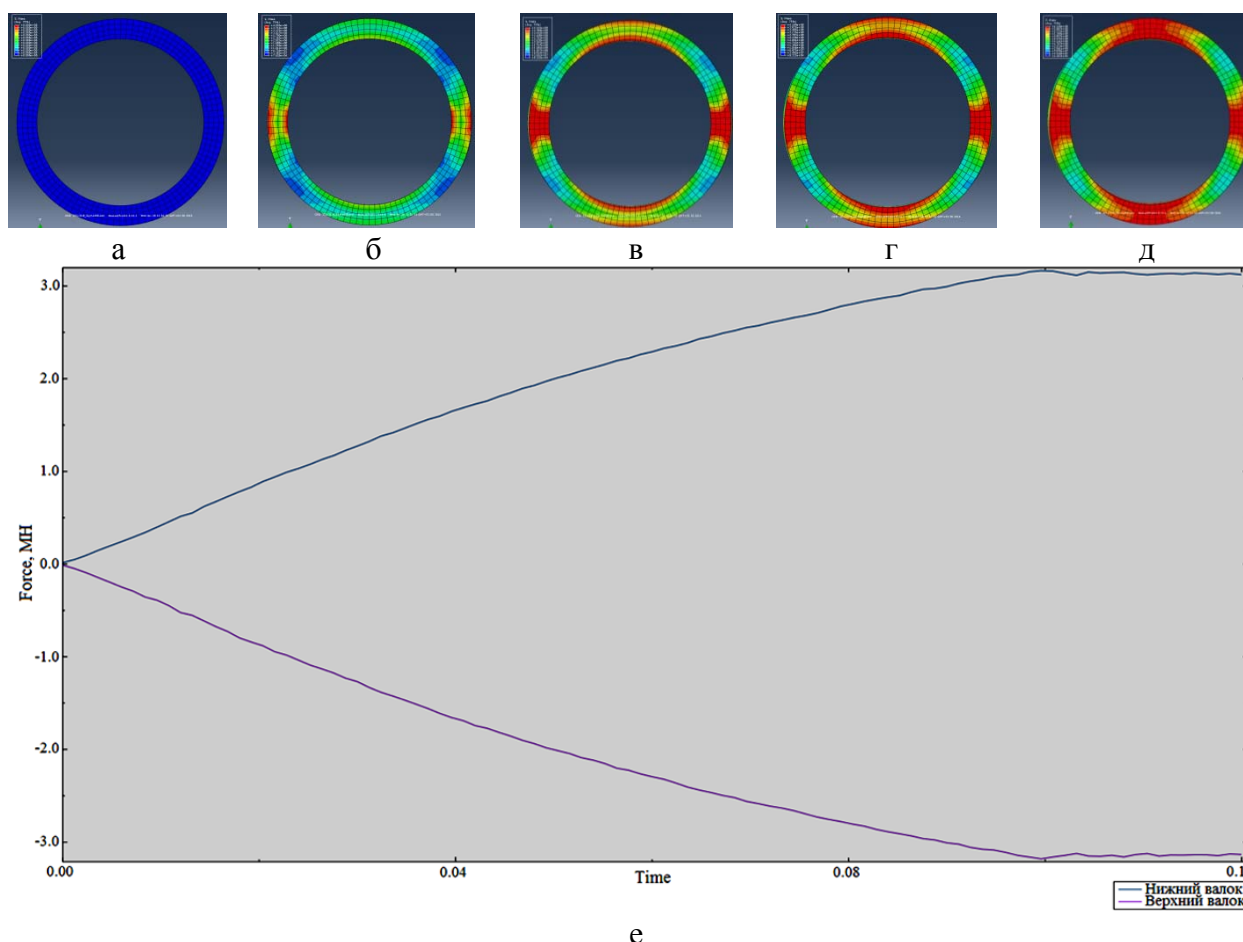


Рис. 6. Расчетные распределения эквивалентных напряжений по сечению трубы (а – д), а также усилие овализации (е) в зависимости от ее обжатия валками (а – исходное состояние; обжатие: б – 2 мм; в – 4 мм; г – 6 мм; д – 8 мм)

Немаловажным при выходе на мировой рынок производителей оборудования является снижение массы, а также производство более компактного оборудования. Известные классические методики расчета рабочих клетей [14] существенно завышают возникающие в них напряжения и деформации, что в совокупности с завышенными энергосиловыми параметрами процесса [8, 14] приводят к весьма громоздким конструкциям. Именно поэтому следует вести более точный проверочный расчет рабочих клетей косовалковых трубоправильных машин с использованием метода конечных элементов. При этом непосредственно трехмерную твердотельную модель траверсы станины рационально импортировать в среду Abaqus CAE из различных пакетов твердотельного проектирования.

Для примера рассмотрен расчет верхней траверсы станины десятивалковой трубоправильной машины. В качестве граничных условий при моделировании были выбраны следующие: плоскости соединения траверсы с колоннами были зафиксированы от перемещения во всех направлениях (рис. 7). Материал траверсы – сталь 09Г2С с пределом текучести 240 МПа. При разбиении на конечные элементы были использованы трехмерные деформируемые элементы С3D4 [7]. В местах установки нажимных механизмов по оси «2» были приложены силы, действующие на валки машины в процессе правки. С внутренней стороны траверса также была нагружена силами, возникающими при развороте вала трубой.

В качестве примера реализации полученной модели на рис. 8 представлены распределения напряжений по телу траверсы, а также распределения относительных перемещений узлов траверсы (рис. 9). Анализ полученных распределений показал, что максимальные напряжения в теле станины имеют место в местах соединения колон и достигают 100–120 МПа, что меньше допустимых напряжений $[\sigma] = 150$ МПа.

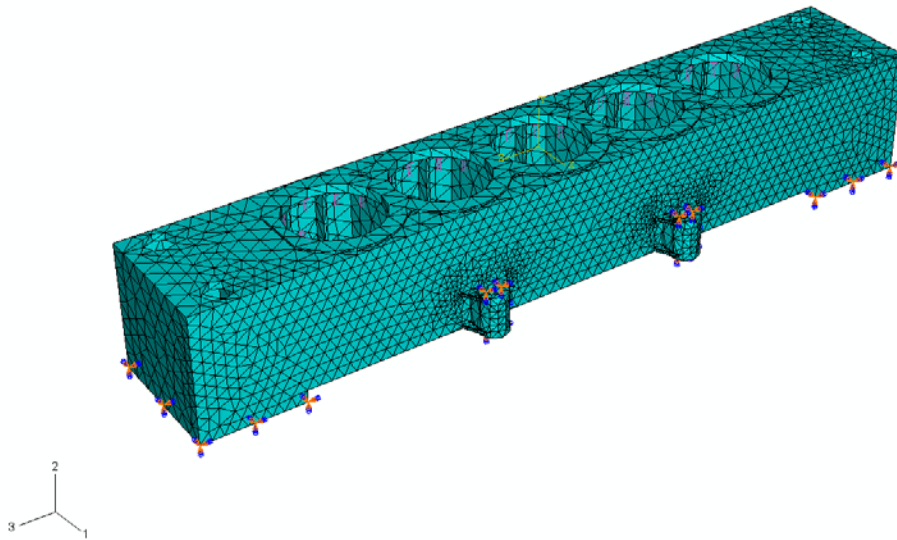


Рис. 7. Конечно-элементная модель верхней траверсы станины

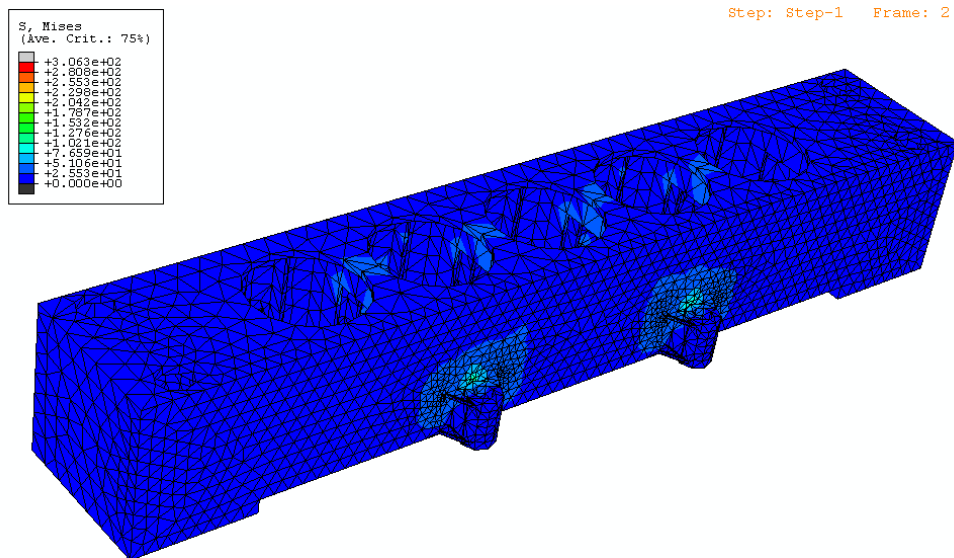


Рис. 8. Распределения напряжений по телу траверсы

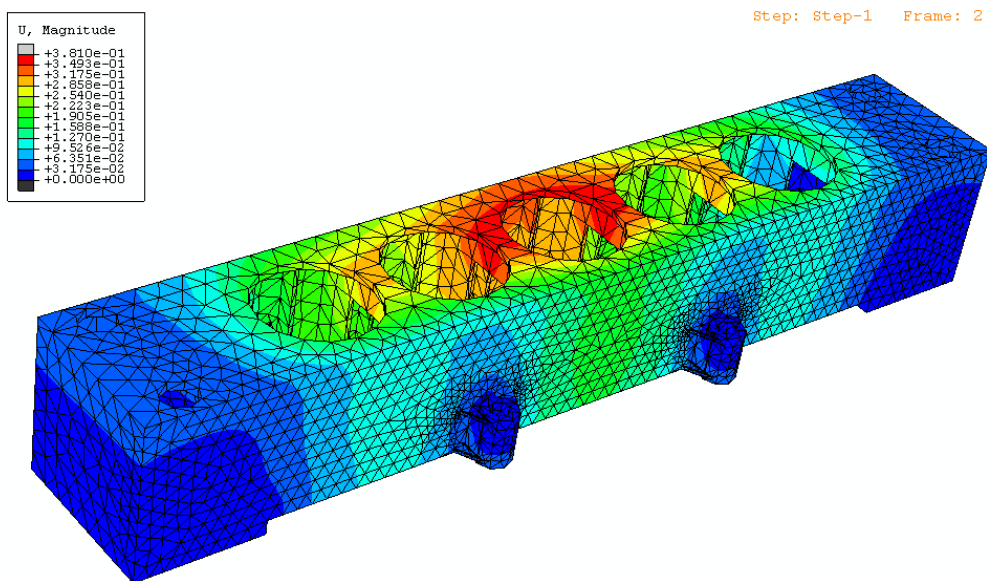


Рис. 9. Распределения относительных перемещений узлов траверсы

ВЫВОДЫ

Результаты полученных конечно-элементных моделей были использованы для анализа влияния, а также для разработки рекомендаций по совершенствованию и автоматизированному проектированию технологических режимов работы и конструктивных параметров механического оборудования для правки труб широкой номенклатуры и различного назначения. Так, например, использование метода конечных элементов для выполнения расчета энергосиловых параметров процесса правки, а также прочностных расчетов механического оборудования, при проектировании десятивалковой трубоправильной машины ОВВ 900x5, позволили снизить общую массу машины с 210 до 80 тонн, что позволило выйти на один уровень с ведущими мировыми производителями правильного оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубное производство / Б. А. Романцев, А. В. Гончарук, Н. М. Вавилкин, С. В. Самусев. – М. : НИТУ МИСиС, 2011. – 970 с. - ISBN:978-5-87623-504-6
2. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко, В.А. Гринкевич. – Днепропетровск: «Системные технологии», 2005. – 448 с.
3. Finite volume computational methods for polymer processing / R.I. Tanner, X. Huang, S.-C. Xue, N. Phan-Thien // Proc. of the 7 Int. Conf. on numerical methods in industrial forming processes. – Enschede (Netherlands). – 1998. – P. 3–9.
4. Zhang Z. Q. A simplified model of maximum cross-section flattening in continuous rotary straightening process of thin-walled circular steel tubes / Z.Q. Zhang, Y.H. Yan, H.L. Yang // Journal of Materials Processing Technology. – Vol. 238. –2016. – P. 305–314. Access mode: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.034>.
5. Zhang Zi-Qian. Prediction of Maximum Section Flattening of Thin-walled Circular Steel Tube in Continuous Rotary Straightening Process // Journal of Iron and Steel Research. – Vol. 23. Issue 8. – 2016. – P. 745-755. Access mode: [http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30116-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30116-9).
6. Analysis of metal forming process based on meshless method / J.-S. Clicil, C. Roque, C. Pan, S.T. Button // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – №80–81. – P. 642–646.
7. Манилык Т. Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5 / Т. Манилык, К. Ильин – М. : МФТИ, Тесис, 2006. – 67 с.
8. Маскилейсон А. М. Трубоправильные машины / А. М. Маскилейсон, В. И. Сапир, Ю. С. Комиссарчук. – М. : Машиностроение, 1971. – 207 с.
9. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. – М.: Машиностроение, 1980. – 157 с.
10. Завгородний Д. В. Экспериментальное исследование влияния углов установки валков на качество выправляемых труб, а также энергосиловые параметры процесса правки / Д. В. Завгородний, А. В. Завгородний // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – № 3. - С. 37–41.
11. Завгородний Д.В. Методы расчета напряжений и деформаций при правке труб изгибом / Д. В. Завгородний, С. В. Новоселов, С. А. Шевцов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА. – 2003. – С.91–94.
12. Исследование процесса правки изгибом труб и трубных заготовок / В. А. Федоринов, Д. В. Завгородний, В. Г. Пашков, А. Ю. Коляда // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 51–54.
13. Завгородний Д. В. Прецизионная правка толстостенных труб нефтяного сортамента на десятивалковых правильных машинах / Д. В. Завгородний, О. А. Гаврильченко, А. В. Завгородний // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1(19). – С. 268–271.
14. Завгородний Д. В. Машина для правки тонкостенных труб / Д. В. Завгородний, А. В. Завгородний // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 353–356.

REFERENCES

1. Trubnoe proizvodstvo / B. A. Romancev, A. V. Goncharuk, N. M. Vavilkin, S. V. Samusev. – M. : NITU MISiS, 2011. – 970 s. - ISBN:978-5-87623-504-6
2. Komp'yuternoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem / V.N. Danchenko, A.A. Milenin, V.I. Kuz'menko, V.A. Grinkevich. – Dnepropetrovsk: «Sistemnye tehnologii», 2005. – 448 s.

3. *Finite volume computational methods for polymer processing / R.I. Tanner, X. Huang, S.-C. Xue, N. Phan-Thien // Proc. of the 7 Int. Conf. on numerical methods in industrial forming processes. – Enschede (Netherlands). – 1998. – P. 3–9.*
4. *Zhang Z. Q. A simplified model of maximum cross-section flattening in continuous rotary straightening process of thin-walled circular steel tubes / Z.Q. Zhang, Y.H. Yan, H.L. Yang // Journal of Materials Processing Technology. – Vol. 238. –2016. – P. 305–314. Access mode: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.034>.*
5. *Zhang Zi-Qian. Prediction of Maximum Section Flattening of Thin-walled Circular Steel Tube in Continuous Rotary Straightening Process // Journal of Iron and Steel Research. – Vol. 23. Issue 8. – 2016. – P. 745–755. Access mode: [http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30116-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30116-9).*
6. *Analysis of metal forming process based on meshless method / J.-S. Clicil, C. Roque, C. Pan, S.T. Button // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – №80–81. – P. 642–646.*
7. *Manilyk T. Prakticheskoe primeneniye programmnoy kompleksa ABAQUS v inzhenernykh zadachah. Versiya 6.5 / T. Manilyk, K. Il'in – M. : MFTI, Tesis, 2006. – 67 s.*
8. *Maskilejson A. M. Trubopravly'nye mashiny / A. M. Maskilejson, V. I. Sapir, Ju. S. Komissarchuk. – M. : Mashinostroeniye, 1971. – 207 s.*
9. *Kroha V.A. Uprochneniye metallov pri holodnoy plasticheskoy deformacii. – M.: Mashinostroeniye, 1980. – 157 s.*
10. *Zavgorodnij D. V. Jeksperimental'noye issledovaniye vliyanija uglov ustanovki valkov na kachestvo vypravlyaemykh trub, a takzhe jenergossilovyye parametry processa pravki / D. V. Zavgorodnij, A. V. Zavgorodnij // Visnik Donbas'koï derzhavnoï mashinobudivnoï akademii : zb. nauk. pr. – Kramators'k : DDMA, 2007. – № 3. – S. 37–41.*
11. *Zavgorodnij D.V. Metody rascheta naprjazhenij i deformacij pri pravke trub izgibom / D. V. Zavgorodnij, S. V. Novoselov, S. A. Shevcov // Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni : zb. nauk. pr. – Kramators'k : DDMA. – 2003. – S.91–94.*
12. *Issledovaniye processa pravki izgibom trub i trubnykh zagotovok / V. A. Fedorinov, D. V. Zavgorodnij, V. G. Pashkov, A. Ju. Koljada // Udoskonalennja procesiv ta obladnannja obrobki tiskom u metalurgii i mashinobuduvanni : zb. nauk. pr. – Kramators'k : DDMA, 2005. – S. 51–54.*
13. *Zavgorodnij D. V. Precizionnaja pravka tolstostennykh trub nefljanogo sortamenta na desjativalkovykh pravil'nykh mashinah / D. V. Zavgorodnij, O. A. Gavril'chenko, A. V. Zavgorodnij // Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2008. – № 1(19). – S. 268–271.*
14. *Zavgorodnij D. V. Mashina dlja pravki tonkostennykh trub / D. V. Zavgorodnij, A. V. Zavgorodnij // Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni : tematich. zb. nauk. pr. – Kramators'k : DDMA, 2007. – S. 353–356.*

Завгородний А. В. – канд. техн. наук, вед. инж.-констр. ОАО «ЭЗТМ»

Грибков Э. П. – канд. техн. наук, доц. ДГМА

ОАО «ЭЗТМ» – Открытое акционерное общество «Электростальский завод тяжелого машиностроения», г. Электросталь, Московская обл., Россия;

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 21.09.2016 г.