

УДК 621.774:621.644

РАЗРУШЕНИЕ СТАЛЬНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ПРИ ДЕФЕКТЕ РАСКАТНОЙ ПРИГАР

Шинкин В.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики (shinkin-korolev@yandex.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119991, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 4)

Аннотация. В отечественных магистральных трубопроводах используются трубы большого диаметра – прямошовные, двухшовные и спиральношовные различного способа изготовления (диаметр труб до 1420 мм, класс прочности до K65 по стандарту API). Новейшими мировыми инновационными технологиями производства прямошовных одношовных сварных труб большого диаметра 1020, 1220 и 1420 мм из сталей класса прочностей K38 – K65 и X42 – X80 с толщиной стенки до 52 мм, длиной до 18 м и рабочим давлением до 22,15 МПа являются процессы, разработанные немецкой фирмой SMS Meer, основу которых составляет процесс прессовой пошаговой формовки по схеме JCOE. Технологии SMS Meer широко используют российские трубные заводы – АО «Выксунский металлургический завод», АО «Ижорский трубный завод», ПАО «Челябинский трубопрокатный завод», а также заводы Германии, Китая и Индии. Однако статистика аварий российских трубопроводов показывает, что стресс-коррозия металла стенок труб в основном происходит именно на трубопроводах большого диаметра 700 – 1420 мм. Причем свыше 80 % разрушений трубопроводов с признаками стресс-коррозии наблюдаются на трубопроводах диаметром 1020 – 1420 мм. Основной причиной коррозионно-механического растрескивания металла стенок труб является совместное действие трех факторов: 1) низкое сталеплавильное качество металла и заводские дефекты труб – большие остаточные напряжения, микротрещины и микрорасслоения металла после формовки трубной заготовки, гофры, риски, раскатные пригары, несплавления сварного шва и так далее; 2) наличие коррозионно-активной среды и ее доступ к поверхности металла; 3) многоцикловая усталость и разрушение металла из-за пульсаций внутритрубных рабочих давлений и гидроударов. На отечественных нефтепроводах почти в два раза больше чем в США и Европе отказов из-за заводских дефектов и брака строительно-монтажных работ. Поэтому необходимо тщательно изучать причины известных случаев отказа трубопроводов из-за производственного брака. В настоящей работе получен математический критерий определения критического внутритрубного давления, при котором происходит упругопластическое разрушение стенки трубы при дефекте раскатной пригар с риской на внешней поверхности трубы. Результаты исследования могут быть использованы при диагностике причин разрушения стальных труб большого и среднего диаметров на магистральных и межпромысловых трубопроводах.

Ключевые слова: стальные сварные трубы большого и среднего диаметров, критическое давление разрыва трубы, раскатной пригар, риска, магистральные и межпромысловые трубопроводы, упругопластическая среда с линейным упрочнением..

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-6-436-442

Современные технологии изготовления стальных труб большого диаметра для магистральных трубопроводов включают в себя большое число термомеханических и механических процессов, осуществляемых на металлургических заводах. К таким процессам относят горячую прокатку стальных слябов и широкой стальной полосы из высокопрочной стали, контролируемое капиллярно-капельное и ламинарное охлаждение для повышения прочностных свойств и уменьшения размеров зерен стали, правку стальной полосы и листа на много-роликовых листопрямляющих машинах для уменьшения волнистости и коробоватости заготовки, обрезку краев стальной полосы и листа на гильотинных и дисковых ножницах, подгибку краев листа на кромкогибочных прессах, формовку листа на трубоформовочных прессах, правку диаметра трубной заготовки на экспандерах и так далее [1 – 36].

Статистика и причины аварий газонефтепроводов

Среднее число инцидентов и аварий за 1999–2009 гг., приходящихся на 1000 км российских магистральных

трубопроводов, составило 0,06 отказов в год. На западноевропейских магистральных трубопроводах среднее число отказов за 1991 – 2006 гг. составило 0,32 отказа в год, на североамериканских – 0,48.

В Европе существуют три наиболее важные причины возникновения аварийных ситуаций и утечек – внешние воздействия на трубопроводы (36 %), стресс-коррозия (29 %) и механические повреждение (24 %).

Основными причинами аварий на российских магистральных трубопроводах в течение 2001 – 2006 гг. стали: внешние воздействия – 34,3 %, брак монтажно-строительных работ – 23,2 %, стресс-коррозия (коррозийное растрескивание при напряжении) – 22,5 %, сталеплавильный брак металла и дефекты труб при их изготовлении – 14,1 %, ошибочные действия персонала – 3 % [18 – 20].

Ежегодно из-за стресс-коррозии и усталостного разрушения от циклических перепадов внутритрубных давлений из нефтепроводов вытекает 10 – 15 млн. т нефти из добываемых в России 305 млн. т (примерно 4 – 5 %). Только от прямых потерь нефти экономиче-

ский ущерб достигает 270 млн. долл. в год. Плотность распределения дефектов стресс-коррозии на магистральных нефтепроводах составляет 14,6 деф./км. Скорость стресс-коррозии на их значительной части равна 0,2 – 0,5 мм/год, но имеет место и бо́льшая скорость – 0,8 – 1,16 мм/год.

За 1991 – 2001 гг. количество аварий на газопроводах России по причине стресс-коррозии составило 22,5 % от общего числа аварий; в 2000 г. количество аварий достигло 37,4 %.

Кроме того, в России находятся в эксплуатации 350 тыс. км межпромысловых трубопроводов, на которых ежегодно отмечается свыше 50 тыс. опасных инцидентов, сопровождающихся выбросами нефти. Основная причина аварий – разрывы труб из-за стресс-коррозии. Износ межпромысловых трубопроводов достигает 80 %, а частота их разрывов на два порядка выше, чем на магистральных трубопроводах, и составляет 1,5 – 2,0 разрыва на 1 км.

Критерий разрыва трубы при дефекте раскатной пригар с риской

Раскатной пригар – дефект поверхности стального листа в виде темного пятна неправильной формы, обра-

зовавшийся от раската куска металла, приварившегося к слябу из-за нарушения технологии разливки или упавшего на поверхность листа при горячей прокатке [12 – 17] (рис. 1).

Риска – дефект поверхности стального листа в виде канавки без выступа кромок с закругленным или плоским дном, образовавшийся от царапания поверхности листа прокатной арматурой или перемещения по поверхности листа твердого тела.

Пусть p – внутреннее давление трубы, h и D – толщина стенки и внешний диаметр трубы ($h \ll D$), σ_v и σ_t – пределы прочности и текучести материала трубы, a , b и Δ – продольный, поперечный размеры раскатного пригара и глубина пригара в стенке трубы ($\Delta < h$), a_1 и Δ_1 – максимальные ширина и глубина риски от раскатного пригара ($\Delta_1 \leq \Delta$), ϕ_1 и ϕ_2 – углы наклона «продольных осей» пригара и риски, соответственно, к окружности поперечного сечения и образующей трубы (рис. 2).

По теории пластического течения деформацию элементов сплошной среды можно представить как сумму идеально упругой и несжимаемой жесткопластической деформаций. При этом упругая деформация подчиняется обобщенному закону Гука, а пластическая – теории Сен-Венана–Мизеса.

Под действием внутреннего давления металл стенки трубы в зоне дефекта раскатной пригар с риской испытывает сложное сопротивление: окружное растяжение, радиальное сжатие и концентрацию напряжений.

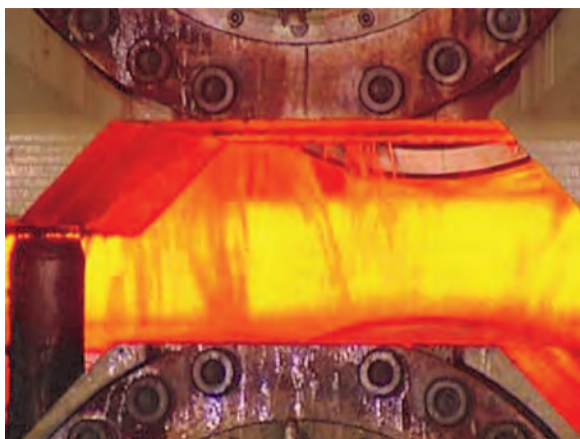


Рис. 1. Горячая стальная полоса между валками прокатного стана

Fig. 1. Hot steel strip between the rolls of rolling mill

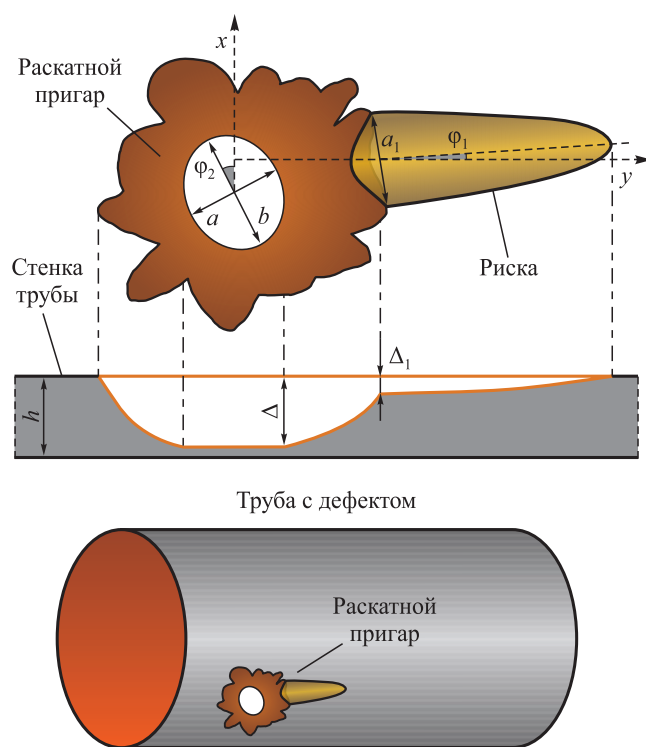


Рис. 2. Труба с дефектом раскатной пригар с риской на внешней поверхности

Fig. 2. Pipe with the rolled burnt-on defect with a hairline on the outer surface

По теории прочности Треска–Сен-Венана внешняя стенка трубы разрушается, когда максимальные касательные напряжения достигают половины предела прочности σ_B .

Разрушение стенки трубы при дефекте раскатной пригар с риской происходит при достижении в трубе критического давления p_{sh}^{kp} :

$$p \geq p_{sh}^{kp},$$

$$p_{sh}^{kp} = \sigma_B / \left| \mu \left\{ \frac{D}{2h} \left[1 + 2 \left(\frac{\Delta - \Delta_1}{h - \Delta_1} \right) \times \right. \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. \times \left(\sqrt{\frac{a}{b}} \cos \varphi_2 + \sqrt{\frac{b}{a}} \sin \varphi_2 \right) \right] \left(1 + 2 \sqrt{\frac{2\Delta_1}{a_1}} \cos \varphi_1 \right) + 1 \right\} \right|,$$

где $\mu = \text{const} \geq 1$ – безразмерный коэффициент (определяется экспериментально).

Концентрацию напряжений в стенке трубы от раскатного пригара с учетом глубины риски учитывает коэффициент

$$K_1 = 1 + 2 \left(\frac{\Delta - \Delta_1}{h - \Delta_1} \right) \left(\sqrt{\frac{a}{b}} \cos \varphi_2 + \sqrt{\frac{b}{a}} \sin \varphi_2 \right),$$

а концентрацию напряжений в стенке трубы от ширины и глубины риски – коэффициент

$$K_2 = 1 + 2 \sqrt{\frac{2\Delta_1}{a_1}} \cos \varphi_1.$$

Пластическая деформация стенки трубы начинается при давлении

$$p \geq p_{sh}^{пл},$$

$$p_{sh}^{пл} = \sigma_T / \left| \mu \left\{ \frac{D}{2h} \left[1 + 2 \left(\frac{\Delta - \Delta_1}{h - \Delta_1} \right) \times \right. \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. \times \left(\sqrt{\frac{a}{b}} \cos \varphi_2 + \sqrt{\frac{b}{a}} \sin \varphi_2 \right) \right] \left(1 + 2 \sqrt{\frac{2\Delta_1}{a_1}} \cos \varphi_1 \right) + 1 \right\} \right|.$$

Расчет критических давлений при $\mu = 1$, $D = 720$ мм, $h = 11$ мм, $\sigma_B = 684$ МПа, $\sigma_T = 614$ МПа, $\Delta_1 = 3$ мм, $a = 20$ мм, $b = 25$ мм, $a_1 = 20$ мм, $\varphi_1 = 10,4^\circ$, $\varphi_2 = 34,3^\circ$ в зависимости от глубины раскатного пригара Δ ($h > \Delta \geq \Delta_1$) в стенке трубы приведен в таблице.

Зависимость критических давлений от глубины раскатного пригара в стенке трубы

Dependence of critical pressures from the penetration depth of the rolled burnt-on into pipe's wall

Δ , мм	3	4	5	6	7	8	9	10
p_{sh}^{kp} , МПа	15,24	11,42	9,13	7,61	6,52	5,70	5,07	4,56
$p_{sh}^{пл}$, МПа	13,68	10,25	8,20	6,83	5,85	5,12	4,55	4,09

Критерий разрыва трубы при дефекте раскатной пригар (без риски)

Разрушение стенки трубы при дефекте раскатной пригар (без риски, $D_1 = 0$) происходит при достижении в трубе критического давления $p_{sh.pr}^{kp}$:

$$p \geq p_{sh.pr}^{kp},$$

$$p_{sh.pr}^{kp} = \frac{\sigma_B}{\mu_1 \left\{ \frac{D}{2h} \left[1 + 2 \frac{\Delta}{h} \left(\sqrt{\frac{a}{b}} \cos \varphi_2 + \sqrt{\frac{b}{a}} \sin \varphi_2 \right) \right] + 1 \right\}}.$$

Пластическая деформация стенки трубы начинается при давлении

$$p \geq p_{sh.pr}^{пл} = \frac{\sigma_T}{\mu_1 \left\{ \frac{D}{2h} \left[1 + 2 \frac{\Delta}{h} \left(\sqrt{\frac{a}{b}} \cos \varphi_2 + \sqrt{\frac{b}{a}} \sin \varphi_2 \right) \right] + 1 \right\}}.$$

Пример разрушения трубы межпромыслового газопровода

На рис. 3 показана разгерметизация стальной трубы межпромыслового газопровода с образованием сквозного дефекта. Рабочее давление в момент инцидента – $p^{раз} = 4,4$ МПа (59 % от проектного давления 7,5 МПа). Прочностные и геометрические характеристики трубы



Рис. 3. Раскатной пригар на внешней поверхности трубы

Fig. 3. Rolled burnt-on defect on the outer surface of the pipe

следующие: класс прочности К60, диаметр 720 мм, толщина стенки 11 мм, длина 11,59 м, масса 2,251 т, внешнее трехслойное изоляционное покрытие. Стальной лист для трубы изготовлен по технологии контролируемой прокатки.

Дефект раскатной пригар с риской представляет собой локальное утонение стенки трубы размером 110×50 мм. При разгерметизации трубопровода произошло выпадение пригара с образованием сквозного отверстия размером 20×25 мм (рис. 4). Выпавший пригар обнаружен не был. Гладкий и волнообразный характер поверхности дефекта показывает, что последний сформировался при температуре, сопоставимой с температурой плавления металла листа, и деформировался в процессе горячей прокатки (рис. 1) вместе с листом как единое целое.

Химический состав и механические свойства основного металла стенки трубы соответствуют требованиям ТУ 1381-012-05757848-2005 для стали класса прочности К60.

Металлографическое исследование металла трубы выполнено центральной специальной лабораторией собственника межпромышленного газопровода. Для этого в стенке трубы были вырезаны три образца. Микроструктуру металла определяли травлением шлифов четырехпроцентным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Микроструктура основного металла трубы на всех шлифах – ферритоперлитная с баллом зерна 9 – 10 по ГОСТ 5639-82. Полосчатость соответствует баллу 2 ряда “Б” по ГОСТ 5640-68.

Первый образец вырезан в месте дефекта в плоскости, поперечной направлению проката листа (рис. 5). Полосчатость перлита по сечению образца неоднородна. У поверхности образца, примыкающей к дефекту, наблюдается локальное искажение однонаправленности перлитной полосчатости. Такие искажения структуры показывают, что дефект был сформирован при горячей деформации в процессе прокатки листа. Отсутствие в

структуре выраженного огибания дефектного участка по всей его протяженности, а также его форма показывают, что дефект деформировался при прокатке вместе с листом как единое целое.

Второй образец (рис. 5) вырезан в месте дефекта в плоскости, параллельной направлению проката листа. На втором образце также наблюдается локальное искажение направленности перлитной полосчатости.

Третий образец был вырезан на расстоянии 300 мм от места дефекта. Его структура была принята за исходную. Размерность неметаллических включений (оксиды точечные) по шкале «а» ГОСТ 1778-70 оценивается баллом 2.

Причина образования раскатного пригара

С точки зрения автора, размеры и вид сквозного отверстия разорванной трубы на ее внешней и внутренней поверхностях свидетельствуют в пользу того, что возможной причиной дефекта раскатной пригар с риской послужило падение шестигранной гайки типа М12 (ГОСТ 5915-70, ширина 19 мм, диагональ 21,94 мм, толщина 10 мм) или М14 (ГОСТ 5927-70, ширина 21 мм, диагональ 24,25 мм, толщина 11 мм) на поверхность раскаленного листа при горячей прокатке (рис. 1).

До момента вдавливания в горячий лист температура гайки была значительно ниже температуры листа. Валки при прокатке не сразу захватили гайку, и от нее на поверхности листа образовалась риска с постепенно увеличивающимися глубиной и поперечным размером. Максимальный поперечный размер риски равен размеру гайки в момент ее вдавливания в лист. Вдавливание гайки в горячий лист было моментальным и привело к локальному повышению температуры металла внутри стенки листа до температуры, сравнимой с температурой плавления металла, и выбросу части полужидкого металла наружу. Это вызвало значительное увеличение размеров дефекта стенки листа в направлении его



Рис. 4. Дефект раскатной пригар на внешней поверхности (а) и сквозное отверстие на внутренней поверхности (б) разорванной трубы

Fig. 4. Rolled burnt-on defect on the outer surface (a) and the through-hole on the inner surface (b) of the rupture pipe



Рис. 5. Образцы дефекта, вырезанные поперечно (вверху) и параллельно (внизу) направлению проката стального листа

Fig. 5. Defect's samples, cut perpendicular (top) and vertical (bottom) to the rolling direction of the steel sheet

внешней поверхности. Так как температура «упругой» гайки была еще существенно ниже температуры раскатанного «пластического» листа, гайка легко вдавилась в лист практически на полную его толщину. После вдавливания гайки в горячий лист ее температура резко увеличилась и приблизилась к температуре листа. При прокатке гайки с листом как единого целого через несколько валков толщина гайки уменьшилась, а ее поперечные размеры увеличились и приобрели овальные очертания.

Прочностной анализ критических давлений разорванной трубы

Геометрические и прочностные характеристики разорванной трубы: $D = 720$ мм, $h = 11$ мм, $\sigma_b = 684$ МПа, $\sigma_t = 614$ МПа, $\Delta_1 = 3$ мм, $a = 20$ мм, $b = 25$ мм, $a_1 = 20$ мм, $\phi_1 = 10,4^\circ$, $\phi_2 = 34,3^\circ$ и $\Delta = 10$ мм. Инцидент произошел при рабочем давлении $p^{\text{разр}} = 4,4$ МПа. Применяя критерий разрыва трубы при дефекте раскатной пригар с риской, получаем, что при минимальном значении $\mu = 1$ имеем $p_{sh}^{\text{кр}} = 4,56$ МПа, $\frac{p_{sh}^{\text{кр}} - p^{\text{разр}}}{p^{\text{разр}}} = 3,6$ %. Отметим, что пластическая деформация стенки трубы началась несколько раньше – при $p_{sh}^{\text{пл}} = 4,09$ МПа.

Результаты вычислений показывают, что критерий разрыва трубы при дефекте раскатной пригар с риской хорошо согласуется с эмпирическими данными разрыва реальной трубы.

Отметим, что пластическая деформация стенки трубы без дефектов при $D = 720$ мм, $h = 11$ мм, $\sigma_b = 684$ МПа, $\sigma_t = 614$ МПа происходит при внутреннем давлении $p_{\text{пл}} = \frac{2h\sigma_t}{D} = 18,76$ МПа, а ее разрушение – при $p_{\text{кр}} = \frac{2h\sigma_b}{D} = 20,90$ МПа.

Разрыв рассматриваемой трубы на трассе при рабочем давлении газа 4,4 МПа ($4,4/20,9 = 21$ %) и значительные размеры дефекта 110×50 мм (хорошо различимые даже невооруженным глазом) указывают на необходимость улучшения методов ультразвукового контроля и гидроиспытаний труб на заводах-изготовителях листа и трубы с целью недопущения подобных дефектов.

Выводы. Предложен математический критерий определения критического внутритрубного давления при дефекте раскатной пригар с риской на поверхности трубы в зависимости от геометрических размеров дефекта и прочностных свойств металла трубы. Результаты исследования применены к реальному инциденту разгерметизации с образованием сквозного дефекта стальной трубы межпромышленного газопровода. Полученный критерий может быть использован при диагностике причин разрушения стальных труб большого и среднего диаметров газонефтепроводов [12 – 36].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Qin Y. Micromanufacturing engineering and technology. – William Andrew, 2015. – 858 p.
2. Klocke F. Manufacturing processes 4. Forming. – Springer, 2013. – 516 p.
3. Lin J., Balint D., Pietrzyk M. Microstructure evolution in metal forming processes. – Woodhead Publishing, 2012. – 416 p.
4. Banabic D. Sheet metal forming processes. Constitutive modelling and numerical simulation. – Springer, 2010. – 301 p.
5. Rees D. Basic engineering plasticity. An introduction with engineering and manufacturing applications. – Butterworth-Heinemann, 2006. – 528 p.
6. Chakrabarty J. Theory of plasticity. – Butterworth-Heinemann, 2006. – 896 p.
7. Kang S.-J. Sintering. Densification, grain growth and microstructure. – Butterworth-Heinemann, 2004. – 280 p.
8. Bhattacharyya D. Composite sheet forming. Vol. 11. – Elsevier Science, 1997. – 530 p.
9. Predeleanu M., Gilormini P. Advanced methods in materials processing defects. Vol. 45. – Elsevier Science, 1997. – 422 p.
10. Abe T., Tsuruta T. Advances in engineering plasticity and its applications (AEPA '96). – Pergamon, 1996. – 938 p.
11. Predeleanu M., Ghosh S. K. Materials processing defects. Vol. 43. – Elsevier Science, 1995. – 434 p.
12. Belsky S.M., Mazur I.P., Lezhnev S.N., Panin E.A. A two-zone model of broadening during rolling // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. No. 2. P. 180 – 185.
13. Muhin U., Belskij S., Makarov E., Koynov T. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table // Frattura ed Integrita Strutturale. 2016. Vol. 37. P. 305 – 311.
14. Muhin U., Belskij S., Makarov E., Koynov T. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips // Frattura ed Integrita Strutturale. 2016. Vol. 37. P. 312 – 317.
15. Muhin U., Belskij S., Koynov T. Study of the influence between the strength of antibending of working rolls on the widening during hot

- rolling of thin sheet metal // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 37. P. 318 – 324.
16. Mazur I.P., Bel'skii S.M. The St Venant zone extent of the self-balancing longitudinal elastic stress // *Materials Science Forum*. 2012. Vol. 704 – 705. P. 33 – 39.
 17. Mukhin Yu.A., Mazur I.P., Bel'skii S.M. Determining the boundaries of the St Venant zone for the self-balancing stress // *Steel in Translation*. 2007. Vol. 37. No. 9. P. 733 – 736.
 18. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Simulation of the shaping of blanks for large-diameter pipe // *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41. No. 1. P. 61 – 66.
 19. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Elastoplastic shaping of metal in an edge-bending press in the manufacture of large-diameter pipe // *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41. No. 6. P. 528 – 531.
 20. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Engineering calculations for processes involved in the production of large-diameter pipes by the SMS Meer technology // *Metallurgist*. 2012. Vol. 55. No. 11-12. P. 833 – 840.
 21. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Message 1. Curvature of sheet // *CIS Iron and Steel Review*. 2016. Vol. 12. P. 37 – 40.
 22. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Message 2. Forces and moments // *CIS Iron and Steel Review*. 2016. Vol. 12. P. 40 – 44.
 23. Shinkin V.N. Geometry of steel sheet in a seven-roller straightening machine // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 11. P. 776 – 780.
 24. Shinkin V.N. Preliminary straightening of thick steel sheet in a seven-roller machine // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 12. P. 836 – 840.
 25. Maksimov E.A., Shatalov R.L. Asymmetric deformation of metal and front flexure of thick sheet in rolling. Part 2 // *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 6. P. 521 – 525.
 26. Matrosov Yu.I., Levchenko V.I., Loskutov A.Yu., Volodarskii V. V., Kolyasnikova N. V., Talanov O. P. Influence of pipe processing on the mechanical properties of K60 steel sheet // *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 6. P. 536 – 540.
 27. Maksimov E.A., Shatalov R.L. Asymmetric deformation of metal and front flexure of thick sheet in rolling. Part 1 // *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 5. P. 442 – 446.
 28. Groshkova A.L., Polulyakh L.A., Travnyanov A.Ya., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Phosphorus distribution between phases in smelting high-carbon ferromanganese in the blast furnace. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 11, pp. 904 – 907.
 29. Podgorodetskii G.S., Yusfin Yu.S., Sazhin A.Yu., Gorbunov V.B., Polulyakh L.A. Production of generator gas from solid fuels. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 6, pp. 395 – 402.
 30. Orelkina O.A., Petelin A.L., Polulyakh L.A. Distribution of secondary gas emissions around steel plants. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 11, pp. 811 – 814.
 31. Polulyakh L.A., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Manganese-ferroalloy production from Russian manganese ore. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 9, pp. 617 – 624.
 32. Kovalev A.I., Vainshtein D.L., Rashkovskii A.Yu., Khlusova E.I., Orlov V.V. Features of structural changes through the cross section of sheet rolled from high strength skelp steels // *Metallurgist*. 2011. Vol. 55. No. 1-2. P. 34 – 45.
 33. Morozov Yu.D., Naumenko A.A., Lyasotskii I.V. Effect of rolling heating and deformation and accelerated cooling regimes on mechanical property formation for rolled steel sheet of strength class Kh80 // *Metallurgist*. 2011. Vol. 54. No. 9-10. P. 686 – 695.
 34. Manzhurin I.P., Sidorina E.A. Dependence of the surface deformation of strip on the parameters of its shaping // *Metallurgist*. 2012. Vol. 56. No. 1-2. P. 37 – 42.
 35. Nikitin G.S., Galkin M.P., Zhikharev P.Yu. Effect of noncontact zones on the deforming forces in metal-shaping operations // *Metallurgist*. 2013. Vol. 56. No. 9-10. P. 766 – 772.
 36. Salganik V.M., Chikishev D.N., Pustovoitov D.O., Denisov S.V., Stekanov P.A. Developing regimes for the asymmetric rolling of low-alloy steel plates to minimize bending of the ends of the plate // *Metallurgist*. 2014. Vol. 57. No. 11-12. P. 1005 – 1008.

Поступила 25 мая 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 6, PP. 436-442.

DESTRUCTION OF LARGE-DIAMETER STEEL PIPES AT ROLLED BURNTON DEFECT

V.N. Shinkin

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

Abstract. In the domestic pipelines the large-diameter pipes of different methods of manufacturing are used – the straight-line-seam welded pipes, the one- and double-seam welded pipes and the spiral-seam welded pipes. The diameters of pipes are up to 1420 mm, the strength class of pipes is up to K65 per the API standard. The world's latest innovative technologies for the production of the large-diameter straight-line-seam single-joint welded pipes (the diameters are 1020 mm, 1220 mm and 1420 mm, the grade strengths of steel are K38 – K65 and X42 – X80, the wall thickness is up to 52 mm, the length is up to 18 m and the working pressure is up to 22.15 MPa) are the processes developed by the German company SMS Meer and based on the step-by-step process of press forming according to the scheme JCOE. The SMS Meer technologies are widely used by the Russian pipe plants – JSC "Vyksa Steel Works", JSC "Izhora Pipe Mill", PJSC "Chelyabinsk Pipe-Rolling Plant", as well as the plants in Germany, China and India. However, the accident statistics of Russian pipelines shows that the stress corrosion of metal of the pipe's wall occurs mainly on the pipelines with the large diameter 700 – 1420 mm. With more than 80 % of the destruction of pipelines with the signs of stress corrosion are observed on the pipelines with the diameters of 1020 – 1420 mm. The

main cause of the corrosion-mechanical cracking of metal of pipe's wall is the combined effect of three factors: 1) low steel-smelting quality of metal and the manufacturing defects of pipes (the large residual stresses, the microcracks and microexfoliation of metal after the pipe blanks' forming, the corrugation and hairlines defects, the rolled burnt-on defects, the faulty fusion of weld seam and so on); 2) presence of corrosive-active environment and its access to the metal surface; 3) high-cycle fatigue and fracture of metal due to the pulsations of the in-tube working pressures and hydroblows. On the domestic pipelines pipes' ruptures are almost two times more frequent than in the United States and Europe due to the manufacturing defects and the construction-installation defects. Therefore, it is necessary to study carefully the causes of the known cases of pipelines' rupture due to the manufacturing defects. In this work, the pipe with the rolled burnt-on and the hairline defect on the outer surface of pipe is considered. The mathematical criterion for determining the critical in-tube pressure at which the elastic-plastic rupture of the pipe's wall is taken place is obtained. The results of the investigation can be used in the diagnostics of the rupture's causes of the steel major- and medium-diameter pipes on the main and interfield pipelines.

Keywords: steel welded pipes of large and medium diameters, critical pressure of pipe's rupture, rolled burnt-on, hairline, main and interfield pipelines, elastoplastic medium with linear hardening.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-6-436-442

REFERENCES

1. Qin Y. *Micromanufacturing engineering and technology*. William Andrew, 2015, 858 p.
2. Klocke F. *Manufacturing processes 4. Forming*. Springer, 2013, 516 p.
3. Lin J., Balint D., Pietrzyk M. *Microstructure evolution in metal forming processes*. Woodhead Publishing, 2012, 416 p.
4. Banabic D. *Sheet metal forming processes. Constitutive modeling and numerical simulation*. Springer, 2010, 301 p.
5. Rees D. *Basic engineering plasticity. An introduction with engineering and manufacturing applications*. Butterworth-Heinemann, 2006, 528 p.
6. Chakrabarty J. *Theory of plasticity*. Butterworth-Heinemann, 2006, 896 p.
7. Kang S.-J. *Sintering. Densification, grain growth and microstructure*. Butterworth-Heinemann, 2004, 280 p.
8. Bhattacharyya D. *Composite sheet forming*. Vol. 11. Elsevier Science, 1997, 530 p.
9. Predeleanu M., Gilormini P. *Advanced methods in materials processing defects*. Vol. 45. Elsevier Science, 1997, 422 p.
10. Abe T., Tsuruta T. *Advances in engineering plasticity and its applications (AEPA '96)*. Pergamon, 1996, 938 p.
11. Predeleanu M., Ghosh S.K. *Materials processing defects*. Vol. 43. Elsevier Science, 1995, 434 p.
12. Bel'skii S.M., Mazur I.P., Lezhnev S.N., Panin E.A. A two-zone model of browdening during rolling. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017, vol. 52, no. 2, pp. 180–185.
13. Muhin U., Bel'skii S., Makarov E., Koynov T. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016, vol. 37, pp. 305–311.
14. Muhin U., Bel'skii S., Makarov E., Koynov T. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016, vol. 37, pp. 312–317.
15. Muhin U., Bel'skii S., Koynov T. Study of the influence between the strength of antibending of working rolls on the widening during hot rolling of thin sheet metal. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016, vol. 37, pp. 318–324.
16. Mazur I.P., Bel'skii S.M. The St Venant zone extent of the self-balancing longitudinal elastic stress. *Materials Science Forum*. 2012, vol. 704–705, pp. 33–39.
17. Mukhin Yu.A., Mazur I.P., Bel'skii S.M. Determining the boundaries of the St Venant zone for the self-balancing stress. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 9, pp. 733–736.
18. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Simulation of the shaping of blanks for large-diameter pipe. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 1, pp. 61–66.
19. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Elastoplastic shaping of metal in an edge-bending press in the manufacture of large-diameter pipe. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 6, pp. 528–531.
20. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Engineering calculations for processes involved in the production of large-diameter pipes by the SMS Meer technology. *Metallurgist*. 2012, vol. 55, no. 11–12, pp. 833–840.
21. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Message 1. Curvature of sheet. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 12, pp. 37–40.
22. Shinkin V.N. The mathematical model of the thick steel sheet flattening on the twelve-roller sheet-straightening machine. Message 2. Forces and moments. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, vol. 12, pp. 40–44.
23. Shinkin V.N. Geometry of steel sheet in a seven-roller straightening machine. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 11, pp. 776–780.
24. Shinkin V.N. Preliminary straightening of thick steel sheet in a seven-roller machine. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 12, pp. 836–840.
25. Maksimov E.A., Shatalov R.L. Asymmetric deformation of metal and front flexure of thick sheet in rolling. Part 2. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 6, pp. 521–525.
26. Matrosov Yu.I., Levchenko V.I., Loskutov A.Yu., Volodarskii V.V., Kolyasnikova N.V., Talanov O.P. Influence of pipe processing on the mechanical properties of K60 steel sheet. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 6, pp. 536–540.
27. Maksimov E.A., Shatalov R.L. Asymmetric deformation of metal and front flexure of thick sheet in rolling. Part 1. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 5, pp. 442–446.
28. Groshkova A.L., Polulyakh L.A., Travyanov A.Ya., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Phosphorus distribution between phases in smelting high-carbon ferromanganese in the blast furnace. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 11, pp. 904–907.
29. Podgorodetskii G.S., Yusfin Yu.S., Sazhin A.Yu., Gorbunov V.B., Polulyakh L.A. Production of generator gas from solid fuels. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 6, pp. 395–402.
30. Orelkina O.A., Petelin A.L., Polulyakh L.A. Distribution of secondary gas emissions around steel plants. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 11, pp. 811–814.
31. Polulyakh L.A., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Manganese-ferroalloy production from Russian manganese ore. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 9, pp. 617–624.
32. Kovalev A.I., Vainshtein D.L., Rashkovskii A.Yu., Khlusova E.I., Orlov V.V. Features of structural changes through the cross section of sheet rolled from high strength skelp steels. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 1–2, pp. 34–45.
33. Morozov Yu.D., Naumenko A.A., Lyasotskii I.V. Effect of rolling heating and deformation and accelerated cooling regimes on mechanical property formation for rolled steel sheet of strength class Kh80. *Metallurgist*. 2011, vol. 54, no. 9–10, pp. 686–695.
34. Manzhurin I.P., Sidorina E.A. Dependence of the surface deformation of strip on the parameters of its shaping. *Metallurgist*. 2012, vol. 56, no. 1–2, pp. 37–42.
35. Nikitin G.S., Galkin M.P., Zhikharev P.Yu. Effect of noncontact zones on the deforming forces in metal-shaping operations. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, no. 9–10, pp. 766–772.
36. Salganik V.M., Chikishev D.N., Pustovoitov D.O., Denisov S.V., Stekanov P.A. Developing regimes for the asymmetric rolling of low-alloy steel plates to minimize bending of the ends of the plate. *Metallurgist*. 2014, vol. 57, no. 11–12, pp. 1005–1008.

Information about the author:

V.N. Shinkin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Chair of Physics (shinkin-korolev@yandex.ru)

Received May 25, 2017