

Моделирование материала цилиндрической заготовки со сварным швом при обжиме-раздаче деталей автомобилей

Р.Г. Пузырь¹ • Ю.Б. Сирая¹ • В.Л. Дятловская¹ • О.Н. Долгих¹

Received: 6 December 2020/ Accepted: 24 May 2021

Аннотация. Показано, что раздача концов трубных заготовок, которые являются магистральными соединительными элементами тормозной системы автомобиля, сопровождается потерей устойчивости в окружном и осевом направлении, а также локализацией деформаций с последующим разрушением в виде образования продольной трещины, зарождающейся на торце заготовки. Наличие сварного шва усложняет в общем условия деформирования при обжиме-раздаче и приводит к разрушению заготовки по сварному шву. Для предотвращения трещинообразования необходимо ужесточать коэффициенты обжима-раздачи, что неизбежно приводит к увеличению количества переходов, трудоемкости процесса и себестоимости изготовления детали в целом. Вопрос деформирования сварных конструкций вызывает интерес с развитием новых материалов для автомобилестроения, таких как соединения двух или более стальных листов с различными механическими свойствами, толщиной или типом покрытия, которые имеют важное значение для снижения веса, минимизации затрат и сокращения брака. Показано, что деформирование трубной заготовки будет зависеть не только от характеристик пластичности основного металла и металла сварочного шва, но также от соотношения площадей трубной заготовки. Уменьшение секущих модулей пластичности сопровождается упрочнением сварного соединения по сравнению с начальным металлом заготовки, соответственно увеличение величины секущего модуля в обеих направлениях-понижением прочностных характеристик металла шва. Дальнейший анализ деформирования сварной заготовки необходимо проводить с учетом локальной анизотропии, вызываемой сварочным швом, что даст возможность определить условия устойчивой пластической деформации и создать дополнительное воздействие на ослабленный участок.

Ключевые слова: цилиндрическая заготовка; сварной шов; пластическая деформация; напряжения, модель, раздача, анизотропия, секущий модуль.

Введение

Трубные элементы со сварным швом нашли широкое применение в автомобильной промышленности. Они являются соединительными элементами топливной, тормозной и других систем автомобилей. Для соединения деталей в таких системах используют расширение концов труб холодной пластической деформацией до необходимого размера.

Раздача концов трубных заготовок сопровождается потерей устойчивости в окружном и осевом

направлении, а также локализацией деформаций с последующим разрушением в виде образования продольной трещины, зарождающейся на торце заготовки [1, 2]. Наличие сварного шва усложняет в общем условия деформирования при обжиме-раздаче и приводит к разрушению заготовки по сварному шву [3, 4]. Для предотвращения трещинообразования необходимо ужесточать коэффициенты обжима-раздачи, что неизбежно приводит к увеличению количества переходов, трудоемкости процесса и себестоимости изготовления детали в целом.

Надежных аналитических методов определения напряженно-деформированного состояния при раздаче заготовок со сварным швом на сегодняшний день не существует. Имеются разрозненные данные, которые учитывают наличие сварного шва с помощью коэффициентов усиления, где зона термического влияния и сам сварочный шов имеют более высокие прочностные

✉ R.G. Puzyr
puzyruslan@gmail.com

¹ Кременчугский национальный университет имени М. Остроградского, Кременчуг, Украина

и пластические характеристики по сравнению с основным металлом заготовки [5]. Также имеются численные решения, в которых в явном виде сложно оценить факторы, влияющие на разрушение сварной конструкции [6–8], где показано, что в основном, механические свойства сварных соединений напрямую зависят от ширины поверхности сварного шва и морфологии перехода между свариваемыми пластинами.

Вопрос деформирования сварных конструкций вызывает интерес с развитием новых материалов для автомобилестроения, таких как соединения двух или более стальных листов с различными механическими свойствами, толщиной или типом покрытия, которые имеют важное значение для снижения веса, минимизации затрат и сокращения брака [9–11].

Цель

Целью работы является разработка метода моделирования материала при раздаче коническим пуансоном цилиндрической заготовки со сварным швом, что позволит, учитывая механические характеристики зоны термического влияния, расширить возможности деформирования.

Наличие сварного шва в цилиндрической заготовке приводит к неопределенности физико-механических характеристик материала, который подвергается холодной пластической деформации. Учет начальной анизотропии металла не позволяет в полной мере определить особенности механических характеристик в зоне наложения сварного соединения, где данные параметры изменяются скачкообразно в тангенциальном направлении [12, 13]. Это приводит систему основной металл-сварной шов к совместной пластической деформации в условиях однородного нагружения, однако, величина

деформаций зависит уже от пластических свойств каждого составляющего системы. Поэтому расчетные зависимости для коэффициентов обжима-раздачи, пригодные для цельных заготовок, зачастую становятся неработоспособными для сварных конструкций. Так, например, в колесном производстве при изготовлении ободьев колес заготовкой является стальная сварная обечайка (рис. 1). Первой операцией при их радиально-ротационном профилировании служит раздача торцов цилиндра с двух сторон. Для уменьшения интенсивности деформирования на последующих переходах профилирования с целью обеспечения минимальной разнотолщинности обода следует увеличивать степень деформации при раздаче заготовки. Варьирование коэффициентами раздачи в сторону их ступенчатого повышения позволяет приблизить форму полуфабриката для первого перехода профилирования к готовому профилю заданного сечения, что значительно уменьшает локализацию деформаций в радиусных сопряжениях. Однако, как показывают эксперименты, приближение коэффициентов раздачи к предельным невозможно из-за наличия сварного соединения.

Исследование

В расчетные коэффициенты вводится поправка на сварной шов. Поправочные коэффициенты, применяемые в расчетах, получены на основе опыта производства и практически не изменяется при раздаче заготовок различных геометрических размеров и марок сталей. То есть, не учитываются особенности деформирования каждой партии заготовок, теряется индивидуальность подхода к проектированию технологического процесса профилирования и, как следствие,



Рис. 1. Процесс изготовления сварной обечайки и ее деформация раздачей с разрушением по сварному шву: (а) заготовка со сварным швом; (б) трещина по сварному шву

удлинится цикл производства и увеличивается технологическая себестоимость. Коэффициенты раздачи принимаются в пределах 1,05 – 1,1, что значительно ниже рекомендуемых при обжиге раздаче трубных заготовок [16, 17]. Поэтому разработка метода расчета напряженно-деформированного состояния сварной заготовки с учетом физико-механических характеристик сварного шва является актуальной задачей не только для колесного производства, но также для машиностроительной отрасли в целом.

Для схематизации процесса раздачи примем, что цилиндрическая оболочка деформируется под действием внедрения пуансона в заготовку, причем она состоит из основного металла и узкой вставки металла с измененными механическими свойствами, имитирующей сварной шов. Причем составляющие конструкции соединены между собой жестко, без зазоров и деформируются одновременно с момента нагружения до прекращения действия сил [14, 15]. Моделирование металла заготовки ведем по аналогии с рекомендациями [18].

При сжатии-растяжении цилиндрической оболочки осевой силой последняя совершит работу

$$A_1 = P\Delta l, \quad (1)$$

где P – осевая сила, (Н);

Δl – изменение высоты цилиндра (м).

Однако

$$\Delta l = \varepsilon l = \frac{Pl}{FE_x} = \frac{Pl}{2\pi RsE_x}, \quad (2)$$

где E_x – секущий модуль в осевом направлении (МПа);

R – радиус срединной поверхности цилиндра (м);

s – толщина стенки заготовки (м)

l – высота цилиндрической заготовки (м).

Тогда

$$A_1 = \frac{P^2 l}{2\pi RsE_x}. \quad (3)$$

При раздаче происходит сжатие недеформируемой части заготовки усилием деформирования P . Эта сила воспринимается оболочкой в целом, но так как она состоит из материалов с разными механическими свойствами, то можно предположить, что часть этой силы воспринимается основным металлом и часть металлом сварного шва. При этом сила совершит работу

$$A_2 = P_{осн}\Delta l_{осн} \pm P_{шв}\Delta l_{шв}, \quad (4)$$

где $P_{осн}$, $P_{шв}$ – усилие, которое воспринимается основным металлом и полоской сварного шва (Н);

$\Delta l_{осн}$, $\Delta l_{шв}$ – изменения высоты цилиндра по основному металлу и по сварному шву (м).

Знак “+” в вышестоящей формуле применяется в том случае, когда металл шва и околошовной зоны имеет повышенные механические характеристики по сравнению с основным металлом и знак “–” в обратном случае.

По аналогии с (2)

$$\Delta l_{шв} = \varepsilon_{шв} l = \frac{P_{шв} l}{F_{шв} E_{шв}};$$

$$\Delta l_{осн} = \varepsilon_{осн} l = \frac{P_{осн} l}{F_{осн} E_{осн}},$$

где $\varepsilon_{шв}$, $F_{шв}$, $E_{шв}$ – относительная деформация, площадь поперечного сечения и секущий модуль металла сварного шва;

где $\varepsilon_{осн}$, $F_{осн}$, $E_{осн}$ – относительная деформация, площадь поперечного сечения и секущий модуль основного металла цилиндрической заготовки.

Тогда работа деформации будет равна

$$A_2 = \left(\frac{P_{шв}^2}{F_{шв} E_{шв}} \pm \frac{P_{осн}^2}{F_{осн} E_{осн}} \right) l \quad (5)$$

Должно выполняться равенство $A_1 = A_2$ или

$$\frac{P^2}{2\pi RsE_x} = \frac{P_{шв}^2}{F_{шв} E_{шв}} \pm \frac{P_{осн}^2}{F_{осн} E_{осн}}. \quad (6)$$

Из схематизации процесса нагружения очевидно, что $P_{осн} + P_{шв} = P$ и принимая равенство изменений высот $\Delta l_{осн} = \Delta l_{шв}$, получим

$$P_{шв} = \frac{F_{шв} E_{шв}}{F_{осн} E_{осн}} \frac{P}{1 \pm \frac{F_{шв} E_{шв}}{F_{осн} E_{осн}}},$$

$$P_{осн} = \frac{P}{1 \pm \frac{F_{шв} E_{шв}}{F_{осн} E_{осн}}}.$$

Подставим значения усилий $P_{шв}$ и $P_{осн}$ в (6) и будем иметь

$$E_x = E_{осн} \left(1 \pm \frac{E_{шв}}{E_{осн}} \frac{F_{шв}}{2\pi Rs} \right). \quad (7)$$

Аналогичные преобразования оформим относительно секущего модуля в тангенциальном направлении.

При определении жесткости в окружном направлении можно исходить из предположения, что оболочка находится под действием равномерного внутреннего давления q , которое производит работу

$$A_1 = q\Delta V,$$

где ΔV – приращение объема оболочки, равное

$$\Delta V = \left[\pi(R+w)^2 - \pi R^2 \right] l \approx 2\pi Rlw.$$

Но

$$\varepsilon = \frac{w}{R} = \frac{\sigma_y}{E_y} = \frac{qR}{E_y s},$$

где w – перемещение (прогиб) материала заготовки в радиальном направлении, откуда $w = \frac{qR^2}{E_y s}$.

Тогда
$$\Delta V = \frac{2\pi R^3 l q}{E_y s}.$$

Следовательно
$$A_1 = \frac{2\pi R^3 l q^2}{E_y s}.$$

В случае оболочки со сварным швом давление q совершает работу

$$A_2 = q_{об} \Delta V_{об} \pm S_{шв} \Delta l_{шв},$$

где $S_{шв} = q_{шв} a_{шв} R$ – сила, приходящаяся на сварной шов; $a_{шв}$ – длина сварного шва;

$$\Delta V_{об} = \left[\pi(R+w)^2 - \pi R^2 \right] l = \frac{2\pi R^2 l q}{E_y s},$$

$$\Delta l_{шв} = \frac{q_{шв} a_{шв} R}{F_{шв} E_{шв}} 2\pi R.$$

Тогда

$$A_2 = \frac{2\pi R^3 l q_{об}^2}{F_{об} s} \pm \frac{2\pi m R^3 a_{шв}^2 q_{шв}^2}{E_{шв} F_{шв}}.$$

Как и в первом случае, должно быть $A_1 = A_2$.

Кроме того,

$$q_{шв} + q_{об} = q, \quad \varepsilon_{об} = \varepsilon_{шв}.$$

Опуская все промежуточные выкладки, представим окончательные результаты:

$$E_y = E_{об} \left(1 \pm \frac{E_{шв} F_{шв}}{E_{об} a_{шв} s} \right). \quad (8)$$

Зададимся геометрическими параметрами оболочки: радиус $R = 1200$ мм, длина $l = 1000$ мм, толщина $s = 14$ мм. Допустим, что сварной шов получен

стыковой сваркой сопротивлением с оплавлением, и имеет X – образное симметричное соединение. Тогда при $s = 14$ мм, площадь поперечного сечения шва равна 112 мм^2 [4]. Имеем

$$E_x = E_{очн} \left(1 \pm \frac{E_{шв}}{E_{очн}} \frac{ls}{2\pi R s} \right) = E_{очн} \pm E_{шв} \frac{1000}{2\pi \cdot 1200} = E_{очн} \pm 0,132 E_{шв},$$

$$E_y = E_{об} \left(1 \pm \frac{E_{шв} F_{шв}}{E_{об} a_{шв} s} \right) = E_{об} \pm E_{шв} \frac{112}{1000 \cdot 14} = E_{об} \pm 0,008 E_{шв}.$$

Так как во время сварки сопротивлением сварочный шов образуется за счет оплавления торцов, то материалом сварного шва является материал исходной заготовки. Т. е. $E_{очн} = E_{шв}$; $E_{об} = E_{шв}$. При этом после охлаждения сварного соединения оно имеет пониженные механические характеристики. Тогда окончательно будем иметь

$$E_x = 0,868 E_{очн} \text{ и } E_y = 0,992 E_{об}.$$

Выводы

Полученные уравнения для секущих модулей в меридиональном и тангенциальном направлении показали, что деформирование трубной заготовки будет зависеть не только от характеристик пластичности основного металла и металла сварочного шва, что очевидно, но также от соотношения площадей трубной заготовки. Из данных соотношения следует, что приведенные секущие модули изменяются по сравнению с начальным модулем пластичности изотропной заготовки в обоих направлениях. Возрастание приведенных модулей пластичности сопровождается упрочнением сварного соединения по сравнению с начальным металлом заготовки, соответственно уменьшение величины секущего модуля в обоих направлениях – понижением прочностных характеристик металла шва. Дальнейший анализ деформирования сварной заготовки необходимо проводить с учетом локальной анизотропии, вызываемой сварочным швом, что даст возможность определить условия устойчивой пластической деформации и создать дополнительное воздействие на ослабленный участок.

References

1. E.A Popov, *Osnovnyy teorii listovoy shtampovki*, Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1977.
2. R.G. Puzyr, O.V. Trotsko and V.Yu. Cherkaschenko, “Vliyaniye geometricheskikh parametrov tsilindricheskoy zagotovki na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye pri razdache konicheskimi puansonami”, *Obrabotka materialov davleniem*, No. 4, pp. 114–121, 2012.

3. Yu.A. Averkiev, A.Yu. Averkiev, *Tehnologiya holodnoy shtampovki*, Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1989.
4. V.V. Dragobetskiy, Yu.A. Boyko and R.G. Puzyr, “Opisanie protsessa formoizmeneniya svarnykh zagotovok”, *Visnik Kremenchutskogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu imeni M. Ostrogradskogo*, No. 2, pp. 79–83, 2008.
5. S.P. Yakovlev, V.G. Kuhar, *Shtampovka anizotropnykh materialov*, Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1986.
6. N.N. Moroz, V.V. Dragobetskiy and Yu.A. Boyko, “Predelnaya stepen deformatsii pri raschete svarnykh tsilindricheskikh zagotovok dlya izgotovleniya obodev koles”, *Visnik KDPU imeni M. Ostrogradskogo*, No. 6, pp. 63–65, 2009.
7. X.G. Qiu, W.L. Chen, “The study on numerical simulation of the laser tailor welded blanks stamping”, *Journal of Materials Processing Technology*, No 187, pp. 128–131, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.128>
8. M.S. Mohebbi and A. Akbarzadeh, “Prediction of formability of tailor welded blanks by modification of MK model”, *International Journal of Mechanical Sciences*, No. 61 (1), pp. 44–51, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.05.001>
9. R.G. Puzyr *et al.*, “Chislennoe modelirovanie poteri ustojchivosti trubnoj zagotovki pri razdache soedinitel'nykh perekhodnikov”, *Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu “HPI”, Sbornik nauchnykh trudov, Seriya: Innovatsijni tekhnologii ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii: NTU “HPI”, No. 12 (1337), 2019, pp. 51–56.*
10. I.Ya. Movshovich, R.G. Puzyr, “Raschet meridional'nykh napryazhenij na pervoy operatsii protsessa radialno-rotatsionnogo profilirovaniya obodev koles”, *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo, Obrabotka materialov davleniem*, No. 10, pp. 3–7, 2013.
11. V.V. Dragobetskiy, R.V. Levchenko and R.G. Puzyr, “Analiz nagruzheniya zagotovki pri radialno-rotatsionnom sposbe polucheniya obodev koles s izmenennoy shemoy vneshnego vozdeystviya”, *Sbornik nauchnykh trudov. Seriya: Obrabotka materialov davleniem*, Kramatorsk: DGMA, No. 1, 2012, pp. 146–149.
12. R.G. Puzyr, D.V. Mospan and V.V. Dragobetskiy, “Opredelenie potrebnogo krutyashego momenta pri radialno-rotatsionnom profilirovanii obodev koles”, *Visnik Kremenchutskogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradskogo*, No. 6, 2008, pp. 64–66.
13. R.G. Puzyr, “Raschet komponent tenzora napryazheniy na vtorom perehode radialno-rotatsionnogo profilirovaniya obodev koles transportnykh sredstv”, *Sbornik nauchnykh trudov. Seriya: Obrabotka materialov davleniem*, Kramatorsk, No. 1, 2016, pp. 164–168.
14. R.G. Puzyr *et al.*, “Raspredelenie napryazheniy na konicheskom uchastke profilya polufabrikata pervogo perehoda radialno-rotatsionnogo profilirovaniya”, *Visnik Kremenchutskogo natsionalnogo universitetu imeni M. Ostrogradskogo*, No. 39, 2015, pp. 67–73.
15. R.G. Puzyr and L.E. Dikaya, “Uchet uprochneniya metalla pri opredelenii zonyi vozmozhnoy koltsevoy poteri ustoychivosti na pervoy operatsii razdachi pri izgotovlenii obodev koles”, *Vestnik Hersonskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta*, No. 3, 2015, pp. 165–169.
16. E.N. Sosenushkin *et al.*, “Analiz protsessa razdachi trubnykh zagotovok pri shtampovke izdeliy s konicheskimi poverhnostyami”, *Sbornik nauchnykh trudov. Seriya: Obrabotka materialov davleniem*, Kramatorsk, No. 2, 2013, pp. 135–141.
17. A.V. Kalyuzhnyi *et al.*, “Intensifikatsiya protsessa razdachi osesimmetricheskikh trubchatykh zagotovok”, *Sbornik nauchnykh trudov. Seriya: Obrabotka materialov davleniem*, Kramatorsk, No. 1, pp. 103–108, 2014.
18. A.S. Avdonin, *Prikladnyye metody rascheta obolochek i tonkostennykh konstruksiy*, Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1969.

Modeling the material of the cylindrical work with welded seam at compression distribution of vehicle parts

R. Puzyr, Yu. Siraia, V. Diatlovska, O. Dolhikh

Abstract. It is shown that the distribution of the ends of tubular billets, which are the main connecting elements of the vehicle brake system, is accompanied by a loss of stability in the circumferential and axial directions, as well as localization of deformations, followed by destruction in the form of a longitudinal crack that occurs at the end of the preform. The presence of the weld complicates the general conditions of deformation during crimping and distribution and leads to the destruction of the workpiece along the weld. To prevent cracking, it is necessary to tighten the crimping and distributing factors, which inevitably leads to an increase in the number of transitions, the complexity of the process and the cost of manufacturing the part as a whole. The issue of deformation of welded structures is of interest with the development of new materials for the automotive industry, such as joining two or more steel sheets with different mechanical properties, thickness or type of coating, which are important for reducing weight, minimizing costs and reducing scrap. It is shown that the deformation of the pipe billet will depend not only on the plasticity characteristics of the base metal and the weld metal, which is obvious, but also on the ratio of the squares of the pipe billet. The increase in the above modulus of plasticity is accompanied by hardening of the welded joint compared with the initial metal of the workpiece, respectively, a decrease in the value of the secant modulus in both directions – a decrease in the strength characteristics of the weld metal. Further analysis of

the deformation of the welded workpiece should be carried out taking into account the local anisotropy caused by the welding seam, which will make it possible to determine the conditions of sustained plastic deformation and create an additional effect on the weakened area.

Keywords: cylindrical billet; weld seam; plastic deformation; stresses, model, distribution, anisotropy, secant modulus.

Моделювання матеріалу циліндричної заготовки із зварним швом при обтиску-роздачі деталей автомобілів

Р.Г. Пузир, Ю.Б. Сіра, В.Л. Дятловська, О.Н. Долгіх

Анотація. Показано, що роздавання кінців трубних заготовок, які є магістральними сполучними елементами гальмівної системи автомобіля, супроводжується втратою стійкості в окружному і осьовому напрямку, а також локалізацією деформацій з подальшим руйнуванням у вигляді утворення поздовжньої тріщини, що зароджується на торці заготовки. Наявність зварного шва ускладнює загалом умови деформування при обтиску-роздаванні і призводить до руйнування заготовки по зварному шву. Для запобігання утворення тріщин необхідно посилювати коефіцієнти обтиску-роздаванні, що неминуче призводить до збільшення кількості переходів, трудомісткості процесу і собівартості виготовлення деталі в цілому. Питання деформування зварних конструкцій викликає інтерес з розвитком нових матеріалів для автомобілебудування, таких як з'єднання двох або більш сталевих листів з різними механічними властивостями, товщиною або типом покриття, які мають важливе значення для зниження ваги, мінімізації витрат і зменшення браку. Показано, що деформування трубної заготовки буде залежати не тільки від характеристик пластичності основного металу і металу зварювального шва, що очевидно, але також від співвідношення площин трубної заготовки. Зростання наведених модулів пластичності супроводжується зміцненням зварного з'єднання в порівнянні з початковим металом заготовки, відповідно зменшення величини модуля пластичності в обох напрямках – зниженням міцності металу шва. Подальший аналіз деформування зварної заготовки необхідно проводити з урахуванням локальної анізотропії, спричиненої зварювальним швом, що дасть можливість визначити умови стійкої пластичної деформації і створити додатковий вплив на ослаблений ділянку.

Ключові слова: циліндрична заготовка; зварний шов; пластична деформація; напруження, модель, роздача, анізотропія, січний модуль.