

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ. СООБЩЕНИЕ 2

Лехов О.С., д.т.н., профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии (MXLehov38@yandex.ru)

Михалев А.В., к.т.н., старший преподаватель кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии (mialex@trubprom.com)

Российский государственный профессионально-педагогический университет
(620012, Россия, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

Аннотация. Изложены результаты расчета напряженного состояния металла в очаге деформации при внедрении разделяющих буртов калиброванного бойка в стальной непрерывнолитой сляб при получении сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Результаты расчета осевых, касательных и эквивалентных напряжений, возникающих в очаге деформации металла при получении трех сортовых заготовок, выполнены в четырех сечениях очага деформации. Показан вид сечения очага деформации и места расположения характерных точек. Напряженное состояние металла в очаге циклической деформации при формировании разделяющими буртами калиброванных бойков из непрерывнолитого сляба трех стальных сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации определено путем решения объемной задачи упругопластичности методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS. Результаты расчета осевых, касательных и эквивалентных напряжений по Мизесу в очаге деформации при формировании разделяющими выступами калиброванных бойков из непрерывнолитого сляба трех стальных сортовых заготовок представлены в виде графиков и таблиц по рабочим поверхностям в четырех поперечных сечениях. Определены величины и закономерности распределения осевых, касательных и эквивалентных напряжений по длине и ширине очага деформации при получении трех сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Показан характер распределения осевых напряжений по характерным линиям, расположенным по длине очага деформации. Приведены значения наибольших сжимающих и растягивающих осевых напряжений, возникающих в очаге деформации при внедрении разделяющих буртов калиброванных бойков в стальной непрерывнолитой сляб, при получении трех сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Ключевые слова: установка, непрерывное литье, сортовая заготовка, сляб, калиброванный боек, очаг деформации, конечный элемент, напряжение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-9-730-734

ПОСТАНОВКА И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Постановка задачи и определение закономерностей распределения перемещений металла в очаге циклической деформации при получении сортовых заготовок из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации рассмотрены в работе [1]. Технология совмещенного процесса включает непрерывное литье сляба в кристаллизаторе и его продольное разделение калиброванными буртами бойков установки на ряд сортовых заготовок, соединенных перемычками, за один проход [2 – 4].

В настоящей работе представлены результаты расчета напряженного состояния металла в очаге деформации при получении трех сортовых заготовок из стали на установке непрерывного литья и деформации. Для этой цели решена задача упругопластичности методом конечных элементов в объемной постановке с использованием пакета ANSYS [5 – 20].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Вид сечения 4 и положение характерных точек представлено на рис. 1.

Результаты расчета осевых (SX , SY , SZ), касательных (SXY , SYZ , SXZ) и напряжений по Мизесу ($SEQV$) приведены в таблице.

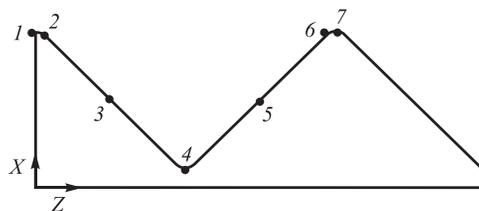


Рис. 1. Вид сечения 4 (положение точек для представления результатов по развертке периметра сечения)

Fig. 1. Section 4 (position of the points for presenting results along the perimeter scan of the section)

Напряжения в шести точках четырех сечений

Stresses at six points of four sections

Номер точки	Напряжение, МПа						
	<i>SX</i>	<i>SY</i>	<i>SZ</i>	<i>SXY</i>	<i>SYZ</i>	<i>SXZ</i>	<i>SEQV</i>
Сечение 1							
1	-91,6	-47,2	-68,1	-8,6	-0,3	-0,2	41,3
2	-102,2	-57,9	-74,2	-9,6	1,7	1,6	42,4
3	-29,2	-73,0	-30,2	-5,7	-4,2	4,9	-1,4
4	-93,0	-46,1	-57,3	1,2	0,2	0,7	42,5
5	-11,6	-80,8	-39,4	-6,5	-5,7	-4,5	-0,3
6	-125,0	-78,6	-92,5	-8,7	-0,8	-0,5	44,0
Сечение 2							
1	-83,5	-47,2	-67,3	7,3	0,6	0	34,0
2	-76,0	-44,2	-60,9	7,0	5,8	2,0	32,0
3	-16,8	-86,9	-56,7	-7,1,0	5,2	10,1	-4,0
4	-111,5	-85,2	-60,4	11,3	1,1	0,9	48,5
5	-24,0	-88,5	-59,7	-7,2	5,0	-9,5	4,3
6	-59,4	-35,1	-44,9	7,9	-6,0	-2,9	27,7
Сечение 3							
1	-31,6	-3,6	-52,3	4,9	1,8	1,4	43,4
2	-37,5	-20,1	-62,3	10,2	10,3	-7,8	46,5
3	-61,5	-19,9	-57,1	12,2	11,6	-1,8	49,3
4	-170,5	-146,2	-98,5	7,5	5,4	-5,9	66,3
5	-66,0	-23,7	-62,0	12,7	-11,5	3,5	50,5
6	-87,0	-62,3	-100,0	13,5	-10,5	10,2	47,9
Сечение 4							
1	-57,0	-11,6	-47,5	6,4	1,5	-1,4	43,0
2	-38,0	8,6	-24,7	7,6	1,6	1,6	43,7
3	-14,4	32,6	-14,9	8,0	2,8	-1,9	49,6
4	-154,7	-92,9	-76,1	11,9	4,8	-5,4	75,6
5	-23,4	26,1	-21,7	7,2	-2,5	4,6	51
6	-30,1	21,7	-16,5	8,4	-1,2	2,8	49,0

Осевые напряжения в очаге деформации являются сжимающими и распределяются по периметру впадины сечения 1 крайне неравномерно. Наибольшей величины, равной -125 МПа, напряжения достигают в направлении оси X в зоне точки 6. Далее это напряжение в точке 3 снижается до $-29,2$ МПа, а затем возрастает до -93 МПа в точке 4 впадины (см. таблицу).

Аналогичный характер распределения имеют напряжения в направлении осей Z и Y , но их значения значительно меньше. Наибольшей величины напряжения в направлении осей Z и Y достигают в зоне точек 2 и 6 и соответственно равны $-92,5$ и $-78,6$ МПа. Напряжение по Мизесу имеет наибольшее значение 44 МПа в зоне точек 2 и 6. Осевые напряжения в сечении 3 в направлении осей X , Y и Z распределяются крайне неравномерно, достигая максимальных значений в зоне точки 4 и соот-

ветственно равных $-170,5$, $-146,2$ и $-98,5$ МПа (рис. 2, см. таблицу). Касательные напряжения на контактных поверхностях достигают наибольших ($13,5$ МПа) значений в зоне точки 6 сечения 3.

В отличие от сечений 1 и 2 в сечении 3 в зоне впадины возникают растягивающие напряжения в направлении осей Z и Y величиной $72,4$ и $61,1$ МПа соответственно (рис. 2).

Другой характер распределения имеют напряжения в направлении оси X , которые в точке 4 впадины сжимающиеся с максимальной величиной $-170,5$ МПа, а затем в зоне впадины переходят в растягивающие величиной $24,7$ МПа.

Напряжения по Мизесу достигают максимальной величины $75,6$ МПа в сечении 4 вблизи точки 4 (см. таблицу).

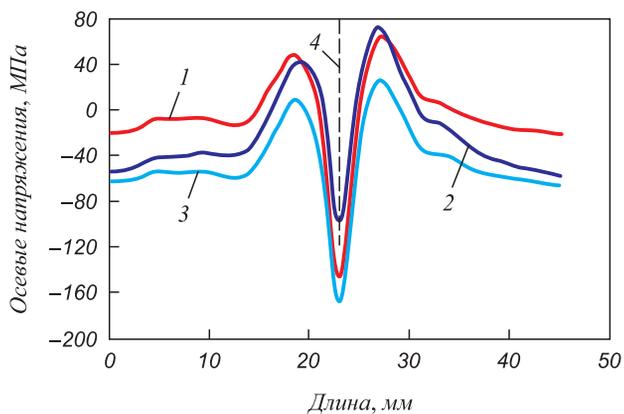


Рис. 2. Осевые напряжения по части длины впадины сечения 3; середина графика проходит через точку 4 (положение точек части сечения представлено на рис. 1):

1 – SY; 2 – SZ; 3 – SX; 4 – линия, проходящая через точку 4

Fig. 2. Axial stresses along the part of cavity length of section 3; middle of the graph passes through the point 4 (position of the points of section part on Fig. 1):

1 – SY; 2 – SZ; 3 – SX; 4 – line passing through point 4

Рассмотрим результаты расчета распределения напряжений по характерным линиям очага деформации при получении трех сортовых заготовок на установке непрерывного литья и деформации. Положение характерных линий показано на рис. 3.

Результаты расчета осевых напряжений по линии 1 и 7 представлены на рис. 4, а, б. Вид графиков напряжений по линии 7 свидетельствует о наличии в конце очага деформации растягивающих напряжений в направлении оси Y величиной 30 МПа. Напряжения в направлении осей Z и X сжимающие, достигающие в конце очага деформации наибольших (–95 МПа) значений.

При формировании разделяющими буртами бойков сортовых заготовок из сляба представляет интерес рас-

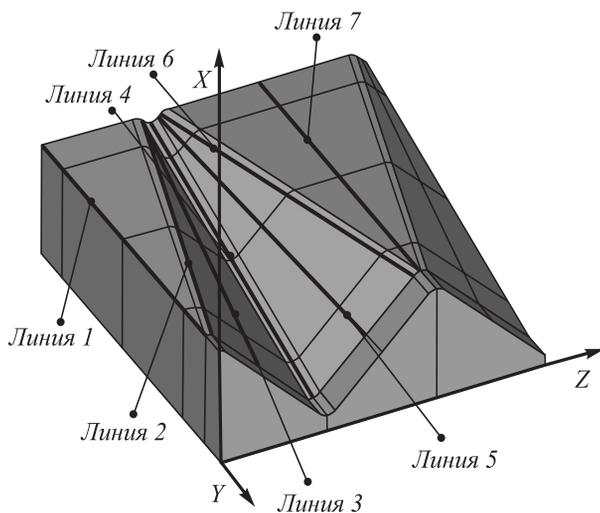


Рис. 3. Положение линий, для которых приведены графики напряжений

Fig. 3. Position of the lines for which stress graphs are given

пределение осевых напряжений по линии 5 очага деформации (рис. 4, в).

Осевые напряжения в направлении осей X и Z сжимающие, достигающие наибольших значений в зоне сечения 2 –88 и –70 МПа соответственно. Другой характер распределения имеют напряжения в направлении оси Y, которые в начале очага деформации растягивающие величиной 30 МПа, затем по длине очага деформации переходят в сжимающие величиной –60 МПа, а в конце очага деформации становятся растягивающими со значением 42 МПа (рис. 4, в).

Напряжения по Мизесу распределяются по длине очага деформации неравномерно, достигая значений до 57 МПа в конце очага деформации.

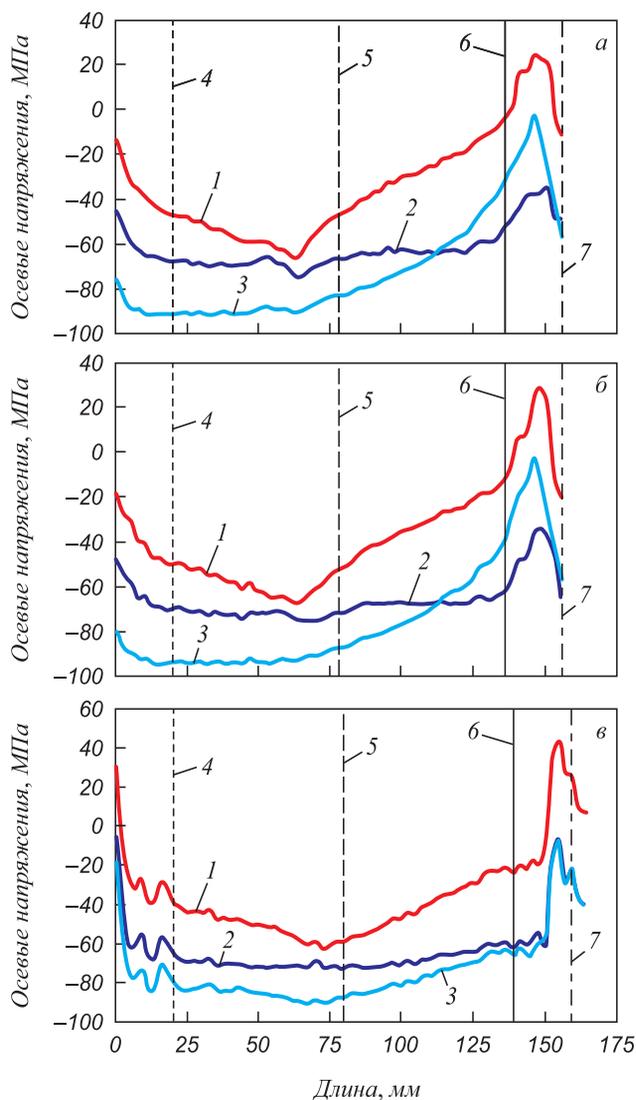


Рис. 4. Осевые напряжения по линии 1 (а) и 7 (б) (начало графика соответствует началу очага деформации):

1 – SY; 2 – SZ; 3 – SX; 4 – сечение 1; 5 – сечение 2; 6 – сечение 3; 7 – сечение 4

Fig. 4. Axial stresses along the line 1 (a) and 7 (б) (beginning of the graph corresponds to the beginning of deformation zone):

1 – SY; 2 – SZ; 3 – SX; 4 – section 1; 5 – section 2; 6 – section 3; 7 – section 4

Выводы

Поставлена и решена объемная задача определения напряженного состояния металла в очаге деформации при получении трех стальных сортовых заготовок из непрерывнолитого сляба за один проход на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лехов О.С., Михалев А.В. Напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации при получении сортовых заготовок из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 7. С. 548 – 553.
2. Лехов О.С., Михалев А.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Теория и расчет. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2017. – 151 с.
3. Лехов О.С., Билалов Д.Х. Технологические возможности установок совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для производства металлопродукции // Производство проката. 2016. № 7. С. 24 – 26.
4. Пат. № 2658761 РФ. Способ непрерывного литья заготовок и устройство для его осуществления / О.С. Лехов, И.В. Ухлов, А.В. Михалев. 2018. Бюл. № 18.
5. Мазур Д.Д., Хижняк В.Л. Сопротивление деформации низколегированных сталей // Сталь. 1991. № 8. С. 41 – 43.
6. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
7. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1978. Vol. 18. No. 8. P. 510 – 518.
8. Sorimachi K., Emi T. Elastoplastic stress analysis of bulging as a major cause of internal cracks in continuously cast slabs // Tetsu to Hagane. 1977. Vol. 63. No. 8. P. 1297 – 1304.
9. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling // Wiley in Steel research international. 2011. Vol. 82. P. 1240 – 1247.
10. Kobayashi S., Oh S-I, Altan T. Metal forming and finite-element method. – New York: Oxford University Press, 1989. – 377 p.
11. Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. – In: Applied Mathematical and Physical Models in Iron and Steel Industry. Proceedings of the 3rd Process Technological Conference, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982. – New York, 1982. P. 264 – 270.
12. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 393 с.
13. Норри Д., Фри Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
14. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 432 с.
15. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
16. Pervez T., Seibi A., Karrech A. Simulation of solid tubular expansion in well drilling using finite element method // Journal of Petroleum Science and Technology. 2005. Vol. 23. No. 7-8. P. 775 – 794.
17. Zienkiewicz O., Taylor R. Finite Element Method: 5th ed. Vol. 1-3. – Butterworth and Heinemann, 2000. – 659 p.
18. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 157-158. P. 496 – 501.
19. Duan H., Velay X., Sheppard T. Application of finite element method in the hot extrusion of aluminium alloys // Materials Science and Engineering A. 2004. Vol. 369. P. 66 – 75.
20. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0.

Поступила в редакцию 25 марта 2019 г.
После доработки 14 апреля 2019 г.
Принята к публикации 5 мая 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 9, PP. 730-734.

STRESS-STRAIN STATE OF METAL IN DEFORMATION ZONE DURING PRODUCTION OF STEEL SECTION BILLETS ON THE UNIT OF COMBINED CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION. REPORT 2

O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev

Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Stress state of metal in deformation zone during introduction of the separating collars of the grooved die into continuously casted steel slab was calculated for production of section billets on the unit of combined continuous casting and deformation. Calculation of axial, tangential and equivalent stresses arising in deformation zone of metal was made in four sections of deformation zone and its results are presented in specific points and lines. View of the section of deformation zone and location of specific points are provided. The stress state of metal in zone of cyclic deformation at formation of three steel section billets from continuously cast slab by separating collars of grooved die on the unit of combined continuous casting and deformation was determined by solving extensive problem of elasticity with the finite element method using the ANSYS package. The results of calculation of axial, tangential and equivalent stresses according to Mises in deformation zone are given in form of graphs and tables for working surfaces in four cross sections. The values and regularities of distribution

of these stresses along the length and width of deformation zone were determined. The character of axial stresses distribution by characteristic lines located along the length of deformation zone is shown. Values of the highest compressive and tensile axial stresses arising in deformation zone during introduction of separating collars of grooved were obtained for the unit of combined continuous casting and deformation.

Keywords: installation, continuous casting, billet, slab, grooved die, deformation zone, final element, stress.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-9-730-734

REFERENCES

1. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. Stress-strain state of metal in deformation zone during production of steel section billets on the unit of combined continuous casting and deformation. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 7, pp. 548–553. (In Russ.).
2. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsesa nepreryynogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva listov iz stali dlya svarnykh trub. Teoriya i raschet* [Unit of Combined Continuous Casting and Deformation for Production of Steel Sheets for Welded

- Pipes. Theory and Design]. Ekaterinburg: Izd-vo UMTs UPI, 2017, 151 p. (In Russ.).
3. Lekhov O.S., Bilalov D.Kh. Technological capabilities of combined continuous casting and deformation units for production of metal products. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 7, pp. 24–26. (In Russ.).
 4. Lekhov O.S., Ukhlov I.V., Mikhalev A.V. *Sposob nepreryvnogo lit'ya zagotovok i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for continuous casting of billets and device for its implementation]. Patent RF no. 2658761. *Byulleten' izobretenii*. 2018, no. 18. (In Russ.).
 5. Mazur D.D., Khizhnyak V.L. Resistance of low-alloyed steels to deformation. *Stal'*. 1991, no. 8, pp. 41–43. (In Russ.).
 6. Khenzel' A., Shpittel' T. *Raschet energosilovykh parametrov v protsessakh obrabotki metallov davleniem* [Calculation of Power Parameters in Metal Forming Processes]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 360 p. (In Russ.).
 7. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1978, vol. 18, no. 8, pp. 510–518.
 8. Sorimachi K., Emi T. Elastoplastic stress analysis of bulging as a major cause of internal cracks in continuously cast slabs. *Tetsu to Hagane*. 1977, vol. 63, no. 8, pp. 1297–1304.
 9. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Wiley in Steel Research International*. 2011, vol. 82, pp. 1240–1247.
 10. Kobayashi S., Oh S-I, Altan T. *Metal forming and finite-element method*. New York: Oxford University Press, 1989, 377 p.
 11. Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. In: *Applied Mathematical and Physical Models in Iron and Steel Industry. Proceedings of the 3rd Process Technological Conference, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York, 1982, pp. 264–270.
 12. Segerlind Larry J. *Applied finite element analysis*. New York etc., 1976. (Russ. ed.: Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov*. Moscow: Mir, 1979, 393 p.).
 13. Norrie D. H., de Vries G. *An introduction to finite element analysis*. Academic Press, New York, 1978. (Russ. ed.: Norrie D., de Vries G. *Vvedenie v metod konechnykh elementov*. Moscow: Mir, 1981, 304 p.).
 14. Gallagher R.H. *Finite Element Analysis: Fundamentals*. Prentice-Hall, New Jersey, 1975, 420 p. (Russ. ed.: Gallagher R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy*. Moscow: Mir, 1984.).
 15. Zienkiewicz O.C., Morgan K. *Finite Elements and Approximation*. New York: Wiley, 1983, 328 p. (Russ. ed.: Zienkiewicz O.C., Morgan K. *Konechnye elementy i approximationsiya*. Moscow: Mir, 1986, 318 p.).
 16. Pervez T., Seibi A., Karrech A. Simulation of solid tubular expansion in well drilling using finite element method. *Journal of Petroleum Science and Technology*. 2005, vol. 23, no. 7-8, pp. 775–794.
 17. Zienkiewicz O., Taylor R. *Finite Element Method: 5th ed.* Vol. 1-3. Butterworth and Heinemann, 2000, 659 p.
 18. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, vol. 157-158, pp. 496–501.
 19. Duan H., Velay X., Sheppard T. Application of finite element method in the hot extrusion of aluminium alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2004, vol. 369, pp. 66–75.
 20. ANSYS. *Structural Analysis Guide. Rel. 15.0*.
- Information about the authors:**
- O.S. Lekhov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy (mxlehov38@yandex.ru)
- A.V. Mikhalev**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy (mialex@trubprom.com)

Received March 25, 2019

Revised April 14, 2020

Accepted May 5, 2020