

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЬНОЙ ПЛИТЫ

*И.Н. Ермаков*

Рассмотрены особенности образования пористости в ходе затвердевания литой плиты из высокомарганцовистой стали. Предложена модель оценки влияния данного вида дефекта на напряженно-деформационное состояние плиты, возникающее в результате ударных нагрузок рудоподготовительных дробилок. Методом конечных элементов в программном пакете DEFORM рассчитаны эквивалентные напряжения в характерных сечениях плиты для различных параметров макропор круглого сечения.

*Ключевые слова:* усадочная пористость, литая плита, высокомарганцовистая сталь, метод конечных элементов, программный пакет DEFORM, напряженно-деформационное состояние, эквивалентные напряжения.

Актуальной задачей современного литейного производства, как и всего заготовительно-перерабатывающего комплекса является создание технологических процессов, обеспечивающих повышение качества выпускаемой продукции при сниженных расходах на материалы и увеличенном сроке эксплуатации.

Одновременное протекание разнородных и взаимосвязанных литейных процессов создает трудности в управлении качеством литых заготовок [1–6]. Вероятностный характер литейных процессов существенно затрудняет их анализ, а разработка математических моделей указанных систем представляется весьма сложной задачей.

В целях создания эффективной стратегии конструкторско-технологического проектирования литых плит из высокомарганцовистой стали для дробильных установок ферросплавного производства необходимо знать особенности образования дефектов в отливке и уметь оценивать их влияние на качество литой заготовки [7–10].

В ранее проведенных исследованиях было определено влияние литейных технологических параметров на структуру и свойства стальных плит при сниженном показателе расхода металла на литники и прибыли [11–12]. Анализировались данные по плитам массой 850 кг с размерами 1500×915×150 мм, изготовленных в условиях ремонтного литейного цеха ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат».

Поскольку способ заполнения формы является одним из важнейших факторов качественного формирования отливки то в ходе экспериментов [13, 14] меняли конструкцию литниковой системы и вариовали местом установки прибыли. При этом оценивали степень коробления плиты, наличие в ней трещин после закалки, наличие и размер утяжины, а также особенности образования усадочной пористости [11].

Предложенные конструкции литниковых систем и варианты установки прибыли показаны на рис. 1 и 2, соответственно.

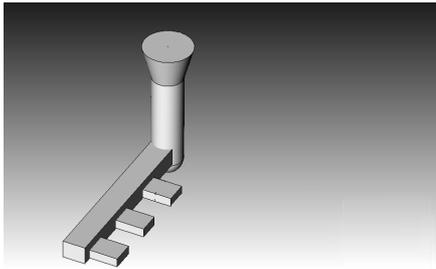
Ультразвуковым сканированием выявлено, что исключить усадочную пористость в плите при условии высокого показателя входа годного лубым из представленных вариантов литья не представляется возможным. Способом подвода металла к телу отливки и местом установки прибыли можно добиться только рассредоточения данного вида дефекта в теле отливки.

Изучив характер распределения пор, выявлено два крайних варианта литниковой системы (ЛС): I-образная и Г-образная. В первом случае пористость концентрируется вдоль поперечного сечения плиты, а во втором – в наибольшей степени рассредоточивается по телу отливки. Причем наличие угловой прибыли (см. рис.2, позиция 3) усиливает данный эффект (рис. 3).

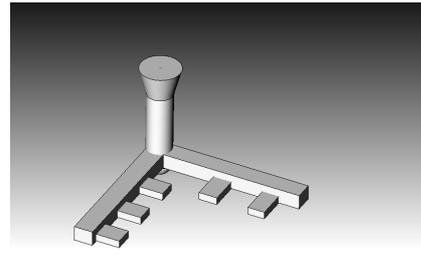
Плита, полученная с I-ЛС, разрушалась на стадии закалки, а плита, изготовленная с Г-ЛС, имела максимальный ресурс работы в дробильной установке. При других вариантах технологии срок эксплуатации плит соответствовал промежуточным значениям между этими крайними вариантами.

Учитывая особенности формирования усадочных дефектов в плите и используя вычислительные мощности вычислительного кластера «Скиф АВРОРА – ЮУрГУ», в программном пакете DEFORM с минимальными временными затратами был осуществлен анализ влияния пористости на напряженно-деформационное состояние плиты. Данный программный пакет наилучшим образом подходит для решения контактных и краевых задач механики деформируемых твердых тел.

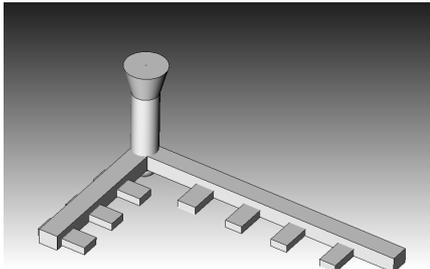
Перед расчетом в DEFORM предположили, что разрушение плит происходит в режиме малоциклового усталости. Усталость связана с циклическими, повторяющимися знакопеременными нагрузками,



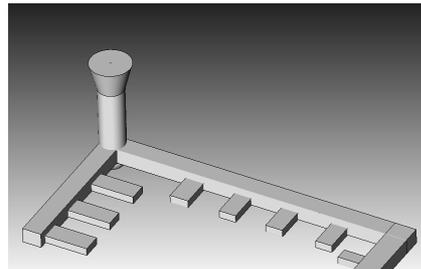
a)



б)

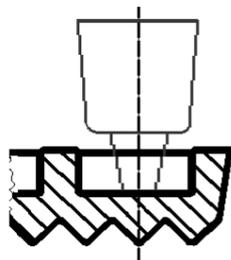


в)

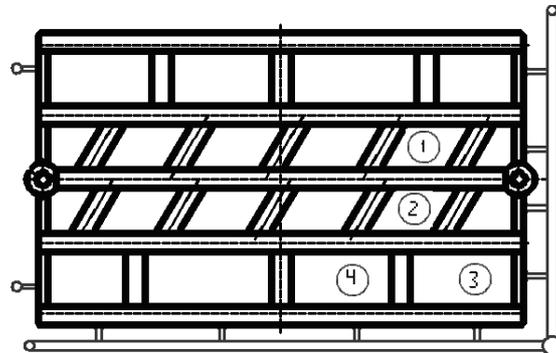


г)

Рис. 1. Предложенные конструкции горизонтальной литниковой системы:  
а – классическая (I-ЛС); б – угловая (V-ЛС); в – Г-образная (Г-ЛС); г – С-образная (С-ЛС)

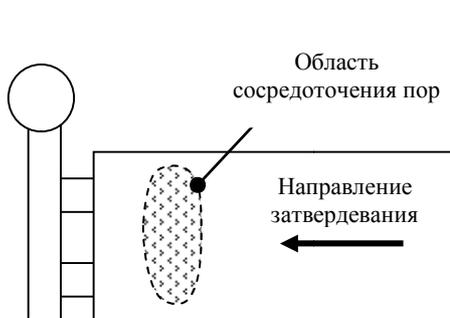


а)

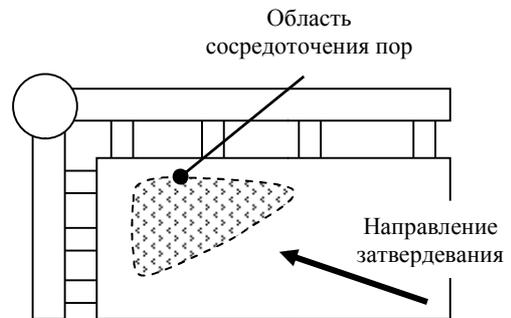


б)

Рис. 2. Варианты установки прямой прибыли:  
а – конструкция прибыли; б – вариант установки прибыли от 1 до 4



а)



б)

Рис. 3. Область сосредоточения макропор в стальных плитах:  
а – для I-образной литниковой системы; б – для Г-образной литниково-питающей системы

при которых на каждом цикле действующее значение эквивалентных напряжений ( $\sigma_{эф}$ ) выше предела пропорциональности (текучести) для данной марки стали. Критерии малоциклового усталости взяли согласно методике, изложенной в работе [15].

Расчет в DEFORM производился для плоской задачи в двух продольных сечениях плиты (рис. 4) и выяснялись опасные зоны в одном цикле нагружения.

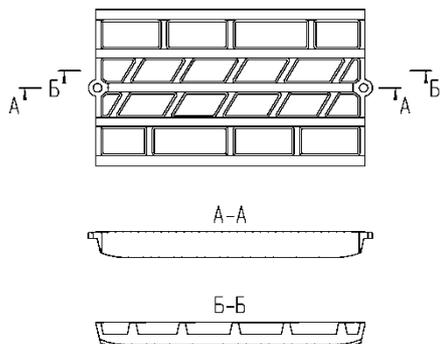


Рис. 4. Исследуемые сечения плиты

В силу сложности моделирования усадочной микропористости и отсутствия фактических значений прогиба плиты при эксплуатации на данном эта-

пе создания модели ограничимся оценкой напряженно-деформационного состояния плиты произведем при моделировании пор круглого сечения диаметром 20 и 10 мм в различных комбинациях (рис. 5).

Необходимым условием для возможности проведения численного расчета является создание конечно-элементной сетки. Искусство разбиения сетки зависит от имеющихся инженерных навыков, и в случае неудачного разбиения расчет будет приводить к ошибочным результатам. Дискретизация тела включает в себя создание различных зон конечно-элементной сетки.

Зоны сетки из конечных четырехузловых элементов и места закрепления плиты показаны на рис. 6, а. В зоне пористости плиты было выполнено сгущение сетки (рис. 6, б).

Модель материала упруго-пластичная. Параметры для построения кривой упрочнения в первом приближении взяты из ГОСТ 977–88, устанавливающего механические свойства стали 110Г13Л. Предел текучести  $\sigma_{0,2} = 305...325$  МПа, предел прочности  $\sigma_b = 810...900$  МПа, относительное удлинение до разрыва  $\delta = 35...40$  %. Однако построенная таким образом кривая не учитывает влияние деформационного разогрева и не устанавливает зависимости напряжений от скорости деформации.

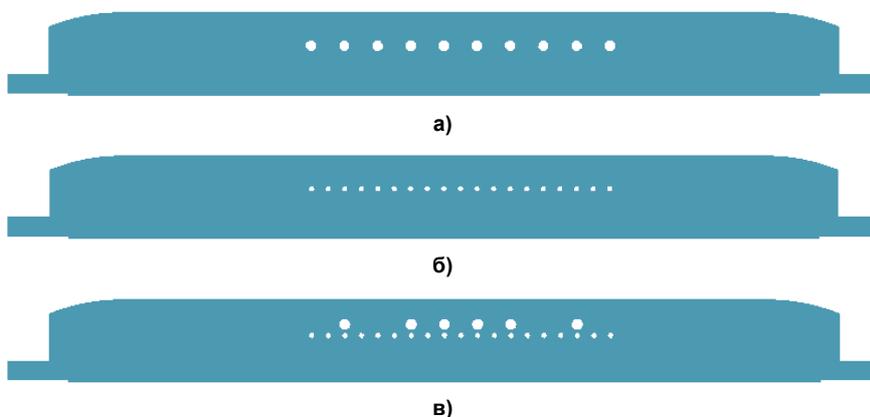


Рис. 5. Варианты расположения пор в сечении А-А: а – поры диаметром 20 мм; б – поры диаметром 10 мм; в – поры диаметром 20 мм и поры диаметром 10 мм

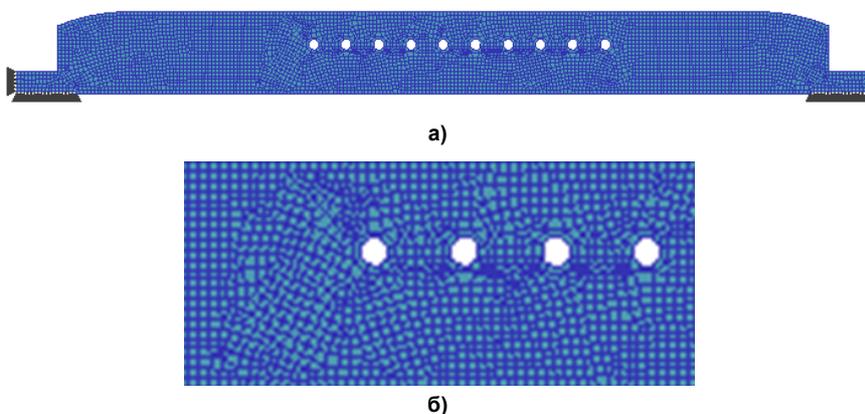


Рис. 6. Конечно-элементная сеточная модель плиты: а – зоны сетки и места закрепления плиты; б – сгущение сетки в зоне пористости

Нагружение исследуемой плиты осуществлялось через деформируемое тело с механическими свойствами подобными свойствам шихты поступающей на вход дробилки в реальных условиях.

Скоростной режим нагружения соответствовал одному циклу смыкания двух плит дробилки СМД-110А.

Для оценки влияния внесенных дефектов один вариант моделирования выполнен без отверстий (рис. 7). Оценку влияния пористости на напряженное состояние плиты будем производить в точках  $O_1$  и  $O_2$ , как наиболее нагруженных.

Типичная картина распределения эквивалентных напряжений для плиты с отверстиями диаметром 10 мм показана на рис. 8, с отверстиями диаметром 20 мм – на рис. 9, с комбинированными отверстиями 10 и 20 мм – на рис. 10.

Анализ результатов компьютерного моделирования показал, что наибольших значений напряжения достигают в зоне крепления плиты к присоединительным местам дробилки, это косвенно подтверждается опытом эксплуатации плит, изготовленных по новой технологии [11], для которых, как и для плит, изготовленных по прежним

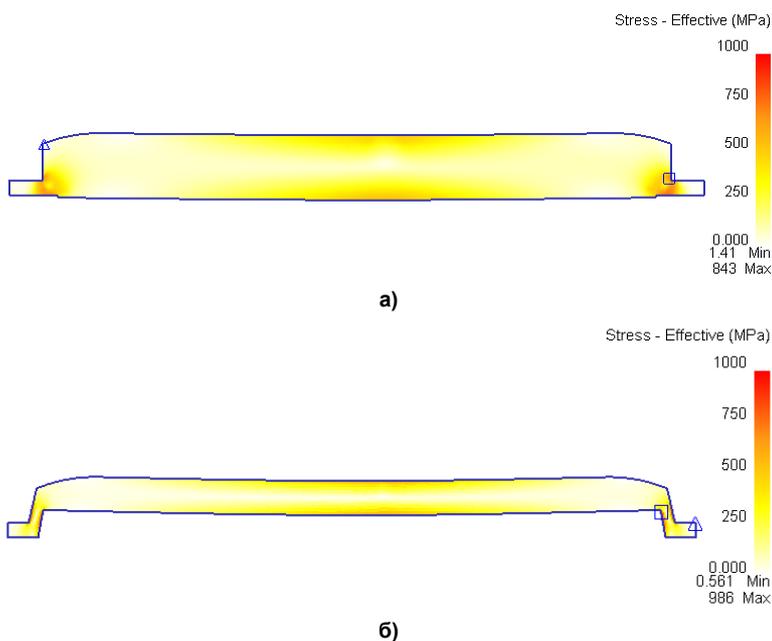


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений в плите без пористости: а – в сечении А-А; б – в сечении Б-Б

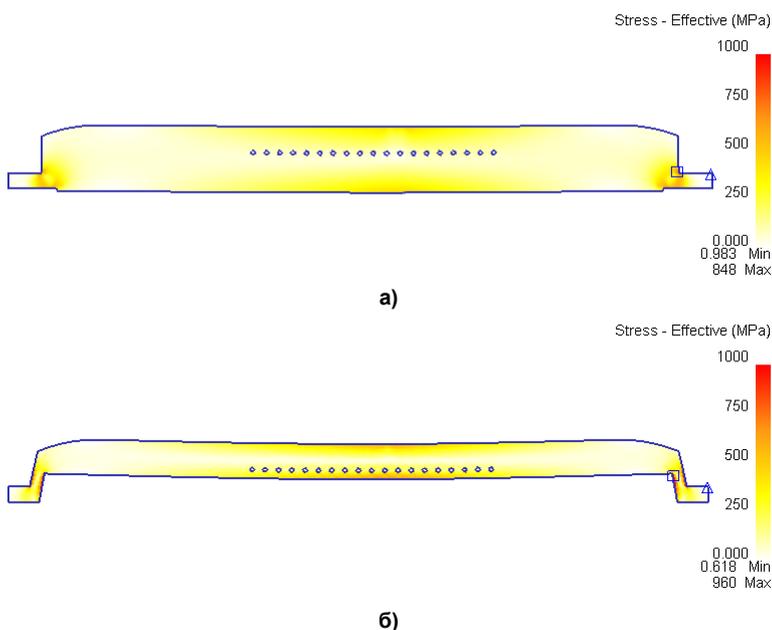


Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений в плите с порами диаметром 10 мм: а – сечение А-А; б – сечение Б-Б

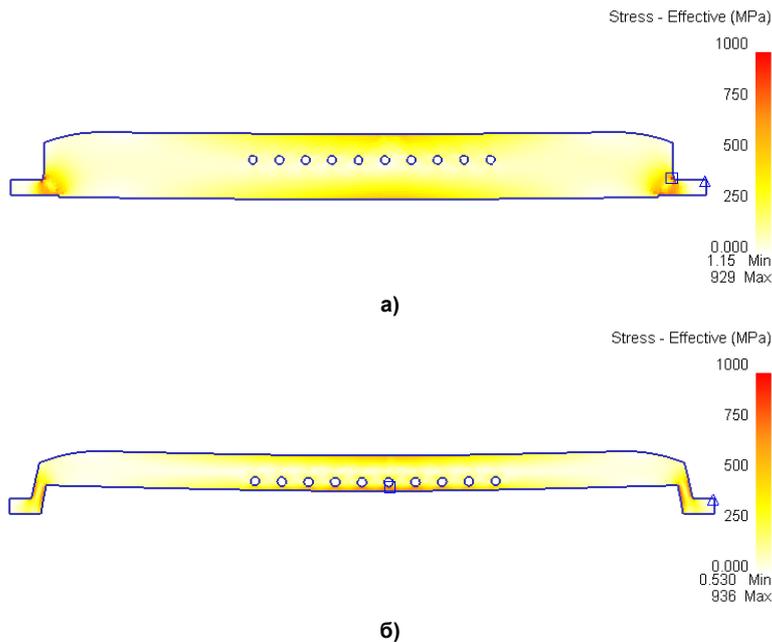


Рис. 9. Распределение эквивалентных напряжений в плите с порами диаметром 20 мм: а – сечение А-А; б – сечение Б-Б

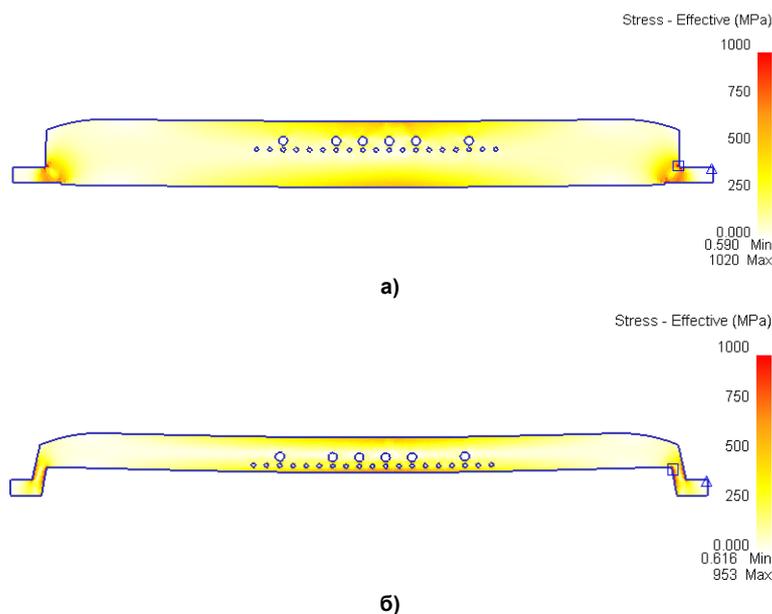


Рис. 10. Распределение эквивалентных напряжений в плите с порами диаметрами 20 мм и 10 мм: а – сечение А-А; б – сечение Б-Б

вариантам технологии, места крепления являются уязвимым местом и довольно часто выходят из строя.

Влияние искусственной пористости на напряженное состояние плит представлено в таблице.

Как видно из таблицы, значения напряжений в точке О в беспористом состоянии существенно выше напряжений, соответствующих пределу текучести стали 110Г13Л.

Из рис. 8–10 и таблицы также видно, что добавление пор и увеличение их размера приводит к увеличению в 1,1–1,3 раза роста действующих в

точке О напряжений, причем значимым оказывается не только размер, но и расположение пор по толщине плиты.

Например, поры размером 10 мм в сечении А-А приводят к уменьшению значений напряжений в точке О по сравнению с вариантом без пор. Из рис. 9 видно, что в сечении А-А пористость располагается вдоль средней линии изгиба плиты, а значит, не оказывает существенного влияния на характер напряженного состояния, тогда как в тонком сечении Б-Б пористость приходится на зону растяжения, что приводит к существенному возрастанию

**Эквивалентные напряжения в точках O<sub>1</sub> и O<sub>2</sub> в зависимости от пор**

| Вариант пористости | $\sigma_{\text{eff}}$ в точке, МПа |                |
|--------------------|------------------------------------|----------------|
|                    | O <sub>1</sub>                     | O <sub>2</sub> |
| Без пор            | 535                                | 531            |
| Поры 10 мм         | 440                                | 657            |
| Поры 20 мм         | 490                                | 756            |
| Поры 10 и 20 мм    | 588                                | 700            |

напряжений в точке O за счет уменьшения площади сечения плиты, сопротивляющейся деформации изгиба.

Разработанная компьютерная модель усадочной пористости в литой плите из высокомарганцовистой стали позволяет оценить влияние макропор на напряженно-деформированное состояние и прогнозировать срок ее эксплуатации. Численным экспериментом установлено, что наличие искусственной пористости диаметром в 10 и 20 мм приводит к увеличению в 1,1–1,3 раза эквивалентных напряжений по сравнению с напряжениями в плите без пор.

**Литература**

1. Знаменский, Л.Г. Металлофосфатные связующие в гипсовых смесях / Л.Г. Знаменский, И.Н. Ердаков // *Литейное производство*. – 2001. – № 1. – С. 22–23.
2. Знаменский, Л.Г. Закономерности формообразования системы «гипс – металлофосфатный раствор» для цветного литья / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, И.Н. Ердаков // *Изв. высш. учеб. заведений. Цветная металлургия*. – 2001. – № 4. – С. 21–25.
3. Знаменский, Л.Г. Получение литейных форм повышенной точности из гипсовых смесей в цветном литье / Л.Г. Знаменский, Б.А. Кулаков, И.Н. Ердаков // *Изв. высш. учеб. заведений. Цветная металлургия*. – 2001. – № 5. – С. 50–55.
4. Швецов, В.И. Повышение стойкости изложниц для цинковых блоков / В.И. Швецов, Б.А. Кулаков, М.А. Иванов // *Литейщик России*. – 2005. – № 10. – С. 40–43.
5. Развитие теории трещиностойчивости отливок / М.А. Иванов, В.И. Швецов, Е.Л. Волосатова, Д.В. Изотов // *Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Металлургия»*. – 2011. – Вып. 17, № 36 (253). – С. 48–50.
6. Иванов, М.А. Температурные поля изложницы при литье однотонных блоков цинка / М.А. Иванов, В.И. Швецов, Б.А. Кулаков // *Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Металлургия»*. – 2005. – Вып. 6, № 10 (50). – С. 99–101.

7. Ольховик, Е.О. Прогнозирование механических свойств в стальных отливках / Е.О. Ольховик, В.В. Десницкий // *Надежность-2003: материалы междунар. науч.-техн. конф. Самара 25–27 нояб. 2003 г.* – Самара, 2003. – Т. II. – С. 137143.

8. Пименов, Д.Ю. Зависимость величины площади износа по задней поверхности зубьев торцовой фрезы в процессе обработки / Д.Ю. Пименов // *Трение и износ*. – 2013. – Т. 34, № 2. – С. 199–203.

9. Гузеев, В.И. Математическое моделирование силы резания при торцевом фрезеровании / В.И. Гузеев, Д.Ю. Пименов // *Вестник машиностроения*. – 2011. – № 10. – С. 70–74.

10. Пименов, Д.Ю. Математическое моделирование упругих перемещений технологической системы при торцевом фрезеровании с учетом износа инструмента / Д.Ю. Пименов, В.И. Гузеев, А.А. Кошин // *Вестник машиностроения*. – 2011. – № 10. – С. 70–74.

11. Ердаков, И.Н. Ресурсосберегающий аспект в производстве литых плит из стали Гадфильда / И.Н. Ердаков // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2011. – № 11. – С. 3–5.

12. Ердаков, И.Н. Исследование процесса изготовления литой плиты методом планируемого эксперимента / И.Н. Ердаков, В.М. Ткачев // *Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Металлургия»*. – 2010. – Вып. 15, № 34 (210). – С. 46–49.

13. Hsu, Fu-Yuan. A multiple-gate runner system for gravity casting / Fu-Yuan Hsu, Mark R. Jolly, John Campbell // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, iss. 17. – P. 5736–5750.

14. Demirer, A. An experimental investigation of the effects of hot runner system on injection moulding process in comparison with conventional runner system / A. Demirer, Y. Soydan, A.O. Kapti // *Materials & Design*. – 2007. – Vol. 28, iss. 5. – P. 1467–1476.

15. Пахомов, В.А. Оценка ресурса трубопроводов ЯЭУ при ограничении перемещений в опорах с использованием критериев малоциклового усталости / В.А. Пахомов, О.В. Саранов // *Проблемы прочности и пластичности: межвуз. сб.* / Нижегород. ун-т. – 2005. – Вып. 67. – С. 37–45.

**Ердаков Иван Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и литейного производства, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Тел.: (351)2679096. E-mail: techproect74@mail.ru.

## ESTIMATION OF POROSITY INFLUENCE ON STEEL PLATE STRAINED STATE

*I.N. Erdakov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
techproect74@mail.ru*

The paper considers the features of porosity formation during solidification of a cast plate of high-manganese steel. The model is suggested for estimation of influence of this type of defect on the plate's strained state resulting from ore-preparation crusher impact load. Equivalent stresses in characteristic cross-sections of the plate are calculated using finite element method in programming tool set DEFORM for different parameters of macropores having circular cross-section.

*Keywords: shrinkage porosity, cast plate, high-manganese steel, finite element method, programming tool set DEFORM, strained state, equivalent stress.*

### References

1. Znamenskij L.G., Erdakov I.N. Metal Phosphate Binders in Gypsum Sands [Metallofosfatnye svyazuyushchie v gipsovykh smesyakh]. *Liteynoe proizvodstvo*, 2001, no. 1, pp. 22–23.
2. Znamenskij L.G., Kulakov B.A., Erdakov I.N. Regularities of Production of Molding Sands and Molds from Materials Based on "Gypsum – Metal Phosphate Solution" System for Non-Ferrous Casting [Zakonomernosti formoobrazovaniya sistemy "gips – metallofosfatnyy rastvor" dlya tsvetnogo lit'ya]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 2001, no. 4, pp. 21–25.
3. Znamenskij L.G., Kulakov B.A., Erdakov I.N. Manufacture of High-Precision Casting Molds from Gypsum Sands for Non-Ferrous Casting [Poluchenie liteynykh form povyshennoy tochnosti iz gipsovykh smesey v tsvetnom lit'e]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 2002, no. 5, pp. 50–55.
4. Shvetsov V.I., Kulakov B.A., Ivanov M.A. Increase Durability of the Moulds for Zinc Blocks [Povyshenie stoykosti izlozhnits dlya tsinkovykh blokov]. *Liteyshchik Rossii*, 2005, no. 10, pp. 40–43.
5. Ivanov M.A., Shvetsov V.I., Volosatova E.L., Izotov D.V. Advancing the Theory of Crack Resistance of Castings [Razvitie teorii treshchinoustoychivosti otlivok]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"*, 2011, no. 37 (253), issue 17, pp. 48–50.
6. Ivanov M.A., Shvetsov V.I., Kulakov B.A. Temperature Fields of the Mould at Moulding of One-Ton Blocks of Zinc [Temperaturnye polya izlozhnitsy pri lit'e odnotonnykh blokov tsinka]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"*, 2005, no. 10 (50), issue 6, pp. 99–101.
7. Ol'khovik E.O., Desnitskiy V.V. Prediction of mechanical properties of steel castings [Prognozirovaniye mekhanicheskikh svoystv v stal'nykh otlivkakh]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Nadezhnost'-2003"*. [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Reliability-2003"]. Vol. 2. Samara, 2003, pp. 137–143.
8. Pimenov D.Yu. The Effect of the Rate Flank Wear Teeth Face Mills on the Processing. *Journal of Friction and Wear*, 2013, vol. 34, no. 2, pp. 156–159. doi: 10.3103/S1068366613020104.
9. Guzeev V.I., Pimenov D.Yu. Cutting Force in Face Milling with Tool Wear. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 10, pp. 989–993. doi: 10.3103/S1068798X11090139.
10. Pimenov D.Yu., Guzeev V.I., Koshin A.A. Elastic Displacement of a Technological System in Face Milling with Tool Wear. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 11, pp. 1105–1109. doi: 10.3103/S1068798X11110219.
11. Erdakov I.N. Resource-Saving Aspect of Flat Cast Hadfield Steel Plates Production [Resursosberegayushchiy aspekt v proizvodstve litykh plit iz stali Gadfil'da]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2011, no. 11, pp. 3–5.
12. Erdakov I.N., Tkachev V.M. Cast Plate Production Process Research by Planned Experiment Method [Issledovanie protsessa izgotovleniya litoi plity metodom planiruемого eksperimenta]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"*, 2010, no. 34 (210), issue 15, pp. 46–49.

---

13. Hsu F.-Y., Jolly M.R., Campbell J. A Multiple-Gate Runner System for Gravity Casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, no. 17, pp. 5736–5750. doi: 10.1016 / j.jmatprotec.2009.06.003.

14. Demirer A., Soydan Y., Kapti A.O. An Experimental Investigation of the Effects of Hot Runner System on Injection Moulding Process in Comparison With Conventional Runner System. *Materials & Design*, 2007, vol. 28, no. 5, pp. 1467–1476. doi: 10.1016/j.matdes.2006.03.015

15. Pakhomov V.A., Sarapov O.V. Resource Estimation of Nuclear Power Unit Pipelines with Limited Movement in the Supports Using the Criteria of Low-Cycle Fatigue [Otsenka resursa truboprovodov YaEU pri ogranichenii peremeshcheniy v oporakh s ispol'zovaniem kriteriev malotsiklovoy ustalosti]. *Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhvuzovskiy sbornik trudov*. [Problems of Strength and Plasticity: Collection of Works]. Vol. 67. Nizhny Novgorod, NNSU Publ., 2005, pp. 37–45.

*Поступила в редакцию 26 сентября 2013 г.*