



# ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 539.3:624.04

А.А. АЛЕКСАНДРОВ, В.Б. АЛЬГИН, д-р техн. наук  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

## ОЦЕНКА НДС ЛИТОСВАРНЫХ РАМ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ С УЧЕТОМ ДЕФЕКТОВ ЛИТЬЯ

*Предложена модель, которая учитывает литейные дефекты (газовые раковины) при расчете напряженного состояния элементов рамы карьерного самосвала. Проведены сравнительные расчеты напряженного состояния элементов рамы с учетом и без учета указанных дефектов литья. Показано, что учет пористости путем введения в модель пустотелых фрагментов качественно изменяет результаты расчета напряжений. Изменение размеров пустотелых фрагментов в меньшей степени сказывается на изменении напряженного состояния.*

**Ключевые слова:** рама карьерного самосвала, литейные дефекты, напряженное состояние, методика расчета

**Введение.** Рама играет роль несущей системы карьерного самосвала. На этапе проектирования раме уделяется особое внимание, так как от ее долговечности зависит срок службы самого автомобиля [1]. В процессе работы рама воспринимает значительные нагрузки, которые возбуждаются неравномерной работой двигателя, неровностями дороги, динамикой процесса движения, а также зависят от массоинерционных и упругих характеристик узлов, агрегатов и перевозимого груза.

При изготовлении крупных литых деталей рам самосвалов в ряде случаев образуются различные дефекты (рисунок 1).

По ГОСТ [2] дефекты отливок из чугуна и стали подразделяют на пять основных групп, одной из которых являются несплошности в теле отливки. Согласно [3], эта группа внутренних дефектов различного вида и происхождения наиболее многочисленна и наиболее опасна из-за последствий,

возникающих при эксплуатации отливок. Характерными типами данной группы дефектности являются газовые и усадочные раковины.

Усадочная раковина (рисунок 2 а) — дефект в виде открытой или закрытой полости с грубой шероховатой, иногда окисленной поверхностью, образовавшейся вследствие усадки при затвердевании металла. Основная причина дефекта — затрудненное питание отливки.

Газовая раковина (см. рисунок 2 б) — дефект в виде полости, образованной выделившимися из металла или внедрившимися в металл газами. Газовая раковина, в отличие от усадочной, имеет сферическую форму и гладкую чистую поверхность.

Описанные дефекты, представляя собой пустоты и являясь концентраторами напряжений, снижают прочностные характеристики конструкции.

Как известно, исходная дефектность — один из основных факторов формирования аварийных си-

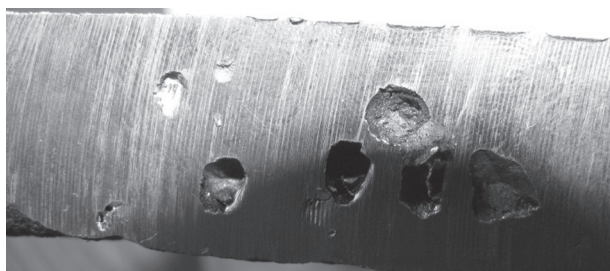
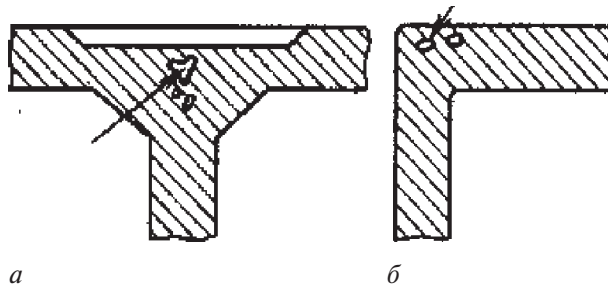


Рисунок 1 — Срез детали с раковинами



а

б

Рисунок 2 — Литейные дефекты:  
а — усадочная раковина; б — газовая раковина

туаций. Поэтому необходимо разработать подходы по учету этого явления при прогнозировании срока службы конструкции.

В последнее время для оценки прочности несущих конструкций используют метод конечных элементов [4, 5].

В статье [4] анализируется чувствительность характеристик напряженного состояния рам карьерных самосвалов к трещиноподобным дефектам с использованием конечно-элементного моделирования и применением подконструкций. Решением статической задачи определяются граничные условия (смещения узлов), которые затем переносятся на контур рассматриваемой отдельно подконструкции с выполнением мелкой дискретизации расчетной области.

В качестве расчетных режимов приняты: номинальное опирание на все колеса, кручение, продольный изгиб, поперечный изгиб. При этом не ясна схема приложения граничных условий, и каким образом определяются значения нагрузок. Указано, что при наличии трещины длиной 10 мм напряжения увеличиваются от 3-х до 15-ти раз по сравнению с номинальными (в зависимости от расчетного режима и модели самосвала).

В качестве критерия предельного состояния в [4] принят коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  для трещины типа  $I$  и наличие краевой трещины в зоне выреза вертикального листа поперечины рамы. Для определения  $K_I$  предлагается в области трещиноподобного дефекта на продолжении его оси рассматривать несколько точек с изменением расстояния  $r = (0,05-0,1)l$  ( $l$  — длина трещины) и определять напряжения  $\sigma_y$  в этих точках. Далее получаемое с помощью формулы  $\sigma_y = K_I / \sqrt{2\pi r}$  значение  $K_I$  вычисляется для рассматриваемых точек и выполняется его экстраполяция при  $r \rightarrow 0$ . При таком подходе получается, что для одного и того же расчетного случая параметр  $K_I$  принимает различные значения по мере удаления от вершины трещины.

С целью обоснования периодичности технической диагностики рам в [4] определена зависимость долговечности  $t$  от длины трещины  $l$  для рам автосамосвалов 4-х моделей. Однако этот вопрос также вызывает сомнения. При длине трещины 5 мм для продольного изгиба величина  $t$  принимает следующие значения: 250 ч — для рам автосамосвалов БелАЗ-75191, 16000 ч — для БелАЗ-7420, 1680 ч — для БелАЗ-549 и 3800 ч — для БелАЗ-7548а. Такое разнообразное и многократное расхождение в долговечности для разных моделей карьерных самосвалов при одинаковой схеме нагружения и одинаковой длине трещины представляется сомнительным.

Авторы [6] рекомендуют при моделировании в расчетную модель конструкции в явной форме вводить дефектность, что дает возможность исследовать чувствительность конструкции к изменению проектных параметров в зависимости от параметров дефектности.

В методике [7] для оценки НДС состояния несущих систем карьерных самосвалов используется расчетный программный комплекс ANSYS и 10 режимов нагружения. При этом в моделях элементов рамы материал задается в виде сплошной среды, не содержащей упомянутых дефектов литья.

Исследований и отработанных методик, позволяющих оценивать, насколько существенно изменяется напряженно-деформированное состояние конструкций при наличии пустот, пока не представлено.

В статье предлагается методика расчета напряженного состояния литых элементов рамы с учетом характерного дефекта — пустот (раковин). Напряжения определяются моделированием нагрузок элементов в пакете ANSYS. Пустоты воспроизводятся путем добавления шарообразных полостей в материал элемента. В применении дополнительного параметра типа коэффициента интенсивности напряжений, описанного в [4], нет необходимости, так как воспроизводимые дефекты вызывают сравнительно небольшую концентрацию напряжений и не имеют трещиноподобной формы. Таким образом напряжения воспроизводятся в явном виде за счет рациональной разбивки исследуемой области.

**Особенности предлагаемой методики.** Объектом исследования является рама, трехмерная виртуальная модель которой представлена на рисунке 3 а. На рисунке 3 б показана литая опора рамы, а на рисунке 3 в — элемент литой опоры, в который добавлены раковины.

Для учета дефектов в модель литой детали рамы добавляются раковины путем удаления шарообразного объема материала. Затем производится КЭ-разбиение элемента со сгущением сетки в области дефектов. На рисунке 4 показана схема разбиения. За начало полярной системы координат принимается центр полости. Здесь  $r$  — радиус внутренней сферы (радиус раковины);  $R$  — радиус внешней сферы (радиус зоны упорядоченного разбиения КЭ-сетки). При разбиении выделяются следующие характерные фрагменты:

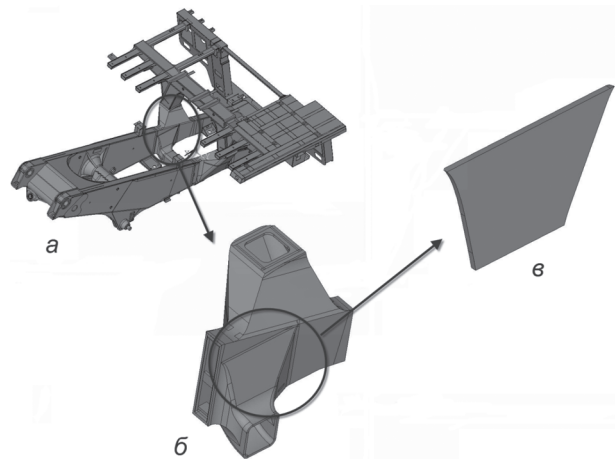


Рисунок 3 — Модель рамы самосвала (а); литая деталь «опора» (б); исследуемый элемент рамы (в)

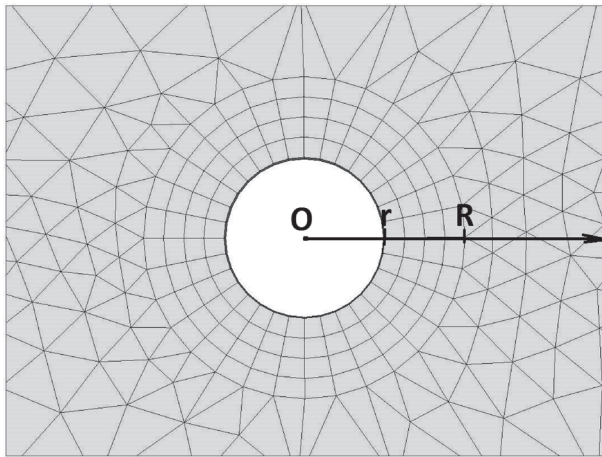


Рисунок 4 — Особенности моделирования полости

- область  $0 \leq x < r$  — объем дефекта — пустота, отсутствие материала;
- окружность  $x = r$  — граница перехода от раковины к материалу. Окружность делится на 32 части, которые являются ребрами конечных элементов. Это производится для повышения точности расчета [8];
- область  $r \leq x < R$  — зона упорядоченного разбиения. В этой области линии ( $R-r$ ) делятся на 4 части;
- область  $x > R$  — основной материал детали. Разбиение элемента детали как в бездефектной модели.

При расчете к модели прикладываются нагрузки в соответствии с методикой [7].

В качестве примера представлены результаты моделирования пяти раковин шарообразной формы для диаметров 4 мм, 6 мм, 8 мм и 10 мм (расстояние между центрами раковин 30 мм, толщина стенки детали равна 24 мм). Для автоматизации моделирования использовался параметрический язык APDL.

На рисунке 5 показан выбранный дефектный элемент опоры рамы в разрезе, на рисунке 6 — КЭ-сетка дефектного элемента опоры с учетом раковин.

Для расчета выбраны два следующих режима работы самосвала: 1) торможение при движении вперед, коэффициент сцепления  $\varphi = 0,7$  и 2) режим наезда на препятствие задним левым колесом. При задании значений нагрузок использована

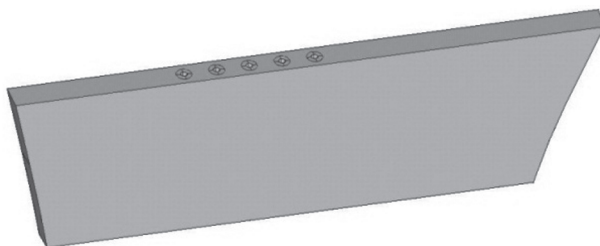
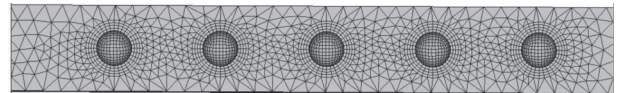


Рисунок 5 — Модель дефектного элемента опоры рамы в разрезе

Рисунок 6 — КЭ-сетка дефектного элемента опоры  
вблизи полостей

ны результаты исследований УГК НТЦ «БелАЗ», полученные для карьерного самосвала БелАЗ грузоподъемностью 180 т.

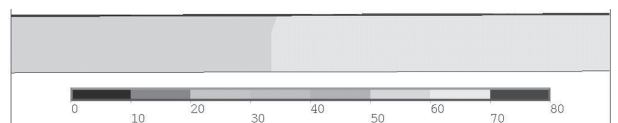
Для оценки напряженного состояния рамы использовалась энергетическая гипотеза Губера–Мизеса [9, 10]. Используемый пакет и методика позволяют определять различные параметры напряженно-деформированного состояния, возникающего при решении различных задач.

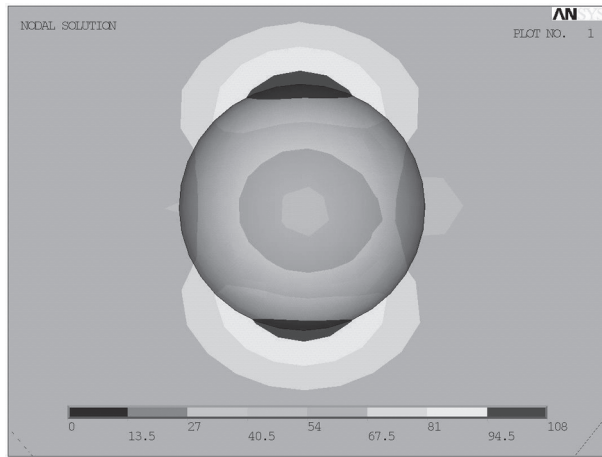
**Результаты расчета.** Расчеты проведены для бездефектного и дефектного варианта представления исследуемого элемента рамы. Результаты представлены в графической форме на рисунках 7–10 в виде распределения эквивалентных напряжений (МПа) в поперечном сечении детали рамы карьерного самосвала. На рисунках 7 и 9 показано распределение эквивалентных напряжений в сечении сплошной (бездефектной) пластины; на рисунках 8 и 10 — в сечении пластины с шарообразными дефектами диаметром 4, 6, 8 и 10 мм для обоих режимов нагружения соответственно (сечение проходит через центры полостей, на рисунках показана одна раковина из пяти).

Из результатов расчета следует, что на первом режиме (торможение при движении вперед,  $\varphi = 0,7$ ) в бездефектном элементе рамы самосвала эквивалентные напряжения не превышают 70 МПа. Максимальное значение эквивалентных напряжений вблизи раковин составляет  $\approx 106$  МПа для раковин диаметром 4 мм;  $\approx 111$  МПа для раковин диаметром 6 мм;  $\approx 115$  МПа при диаметре 8 мм и  $\approx 118$  МПа при диаметре 10 мм.

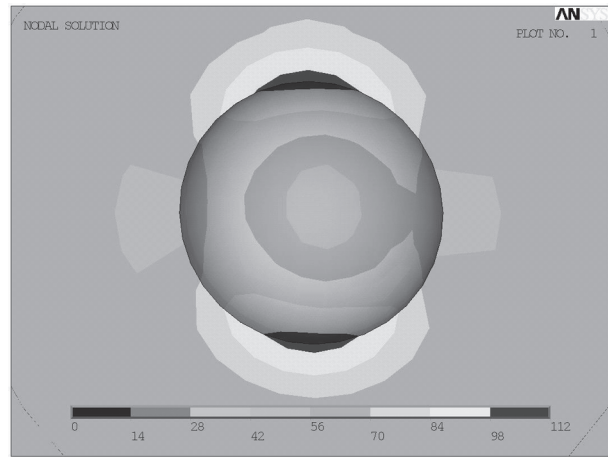
На втором режиме (наезд на препятствие задним левым колесом) в бездефектном элементе рамы эквивалентные напряжения не превышают 75 МПа. Максимальное значение эквивалентных напряжений вблизи раковин:  $\approx 108$  МПа для раковин диаметром 4 мм;  $\approx 110$  МПа для раковин диаметром 6 мм;  $\approx 116$  МПа при диаметре 8 мм и  $\approx 122$  МПа при диаметре 10 мм.

Полученные значения эквивалентных напряжений не достигают предела текучести для стали 15НМФЛ ( $\sigma_T = 310$  МПа), но приближаются к нему. Это может сказаться на циклической проч-

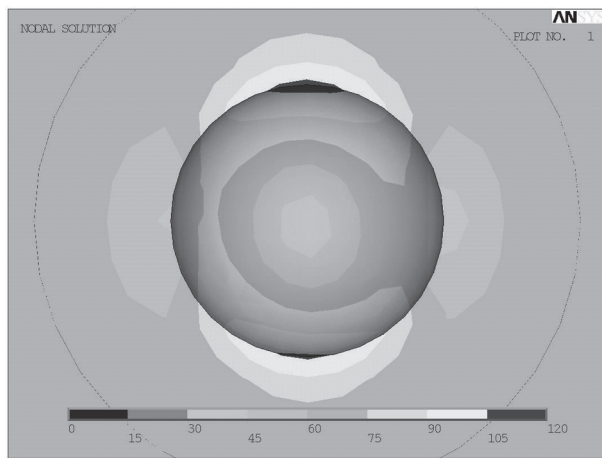
Рисунок 7 — Распределение эквивалентных напряжений в сечении стенки опоры при отсутствии дефектов (торможение при движении вперед, коэффициент сцепления  $\varphi = 0,7$ )



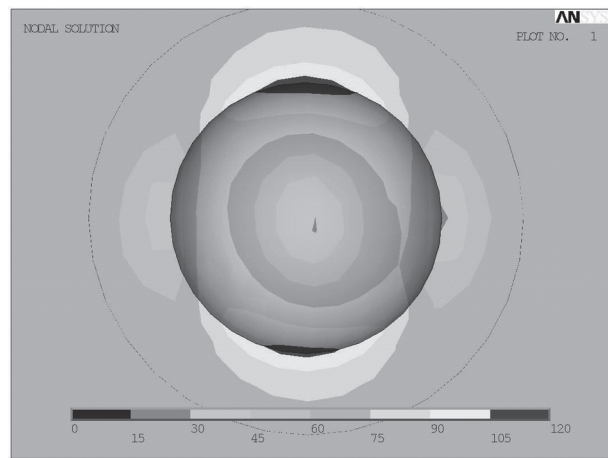
а



б



в



г

Рисунок 8 — Распределение эквивалентных напряжений в сечении стенки опоры вблизи раковины диаметром: а — 4 мм; б — 6 мм; в — 8 мм; г — 10 мм (торможение при движении вперед, коэффициент сцепления  $\varphi = 0,7$ )

ности, кроме того повышается вероятность поломки из-за перегрузки.

Обобщая результаты моделирования, можно сделать следующие выводы:

- 1) при наличии шарообразных раковин диаметром 4 мм и выше максимальное значение эквивалентных напряжений повышается в полтора-два раза;
- 2) изменение диаметра раковин в пределах 4–10 мм практически не влияет на уровень эквивалентных напряжений в сечении пластины;
- 3) при моделировании был использован наиболее щадящий с точки зрения напряженности шарообразный дефект. При других формах дефектов

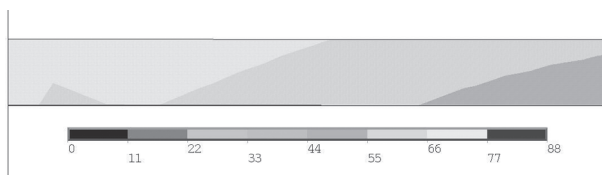


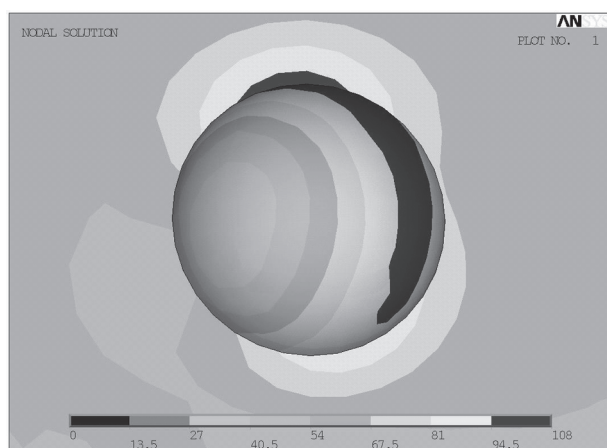
Рисунок 9 — Распределение эквивалентных напряжений в сечении стенки опоры при отсутствии дефектов (наезд на препятствие задним левым колесом)

(узкие, заостренные) рост напряжений наверняка будет выше, поскольку реальные пустоты имеют во многих случаях форму, отличающуюся от шаровидной.

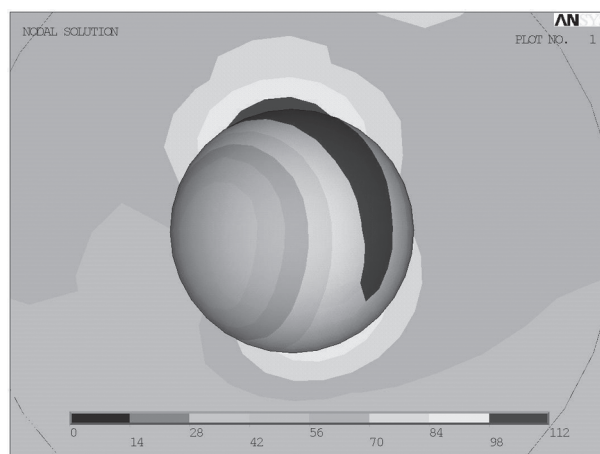
**Заключение.** Предложена модель, которая учитывает влияние литейных дефектов (газовых раковин) на напряженное состояние рамы карьерного самосвала. Показано, что учет пористости путем введения в модель пустотелых фрагментов качественно изменяет результаты расчета напряжений: происходит скачкообразный (до двух раз) рост напряжений в окрестностях пустотелых фрагментов. Варьирование размерами пустотелых фрагментов сказывается в меньшей степени на изменении напряжений.

Предложенная методика моделирования напряжений может быть применена к различным элементам рамы, позволяет изменять размеры раковин, их количество и расстояние между ними.

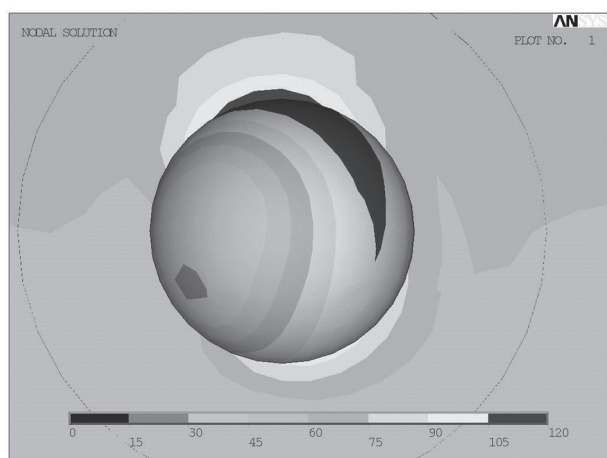
Развитие работы позволит определить допустимые значения размеров дефектов с учетом их расположения в деталях рам карьерных самосвалов. Для верификации результатов расчета целе-



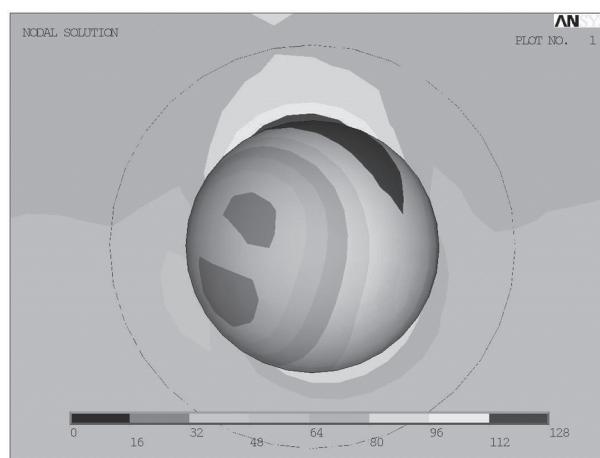
а



б



в



г

Рисунок 10 — Распределение эквивалентных напряжений в сечении стенки опоры вблизи раковины диаметром: а — 4 мм; б — 6 мм; в — 8 мм; г — 10 мм (наезд на препятствие задним левым колесом)

сообразно провести соответствующие экспериментальные работы.

#### Список литературы

1. Мариев, П.Л. Карьерные самосвалы особо большой грузоподъемности. Проектирование, технологии, маркетинг / П.Л. Мариев [и др.]. — Минск: Интегралполиграф, 2008. — 320 с.
2. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов: ГОСТ 19200-80.
3. Классификация дефектов отливок из чугуна и стали. — Барнаул, 2000. — 20 с.
4. Доронин, С.В. Оценка и регулирование свойств рам карьерных самосвалов с трещиноподобными дефектами / С.В. Доронин, Т.В. Донцова / Журнал Сибирского федерального университета. — 2012. — Т. 5, № 6. — С. 703–714.
5. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: практич. рук-во / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. — Изд. 2-е, испр. — М.: Едиторал УРСС, 2004. — 272 с.
6. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций и технических систем / С.В. Доронин [и др.]. — Новосибирск: Наука, 2005. — 250 с.
7. Берлина, Л.В. РР-890. Методика расчета несущих систем карьерных самосвалов «БелАЗ» с использованием сред объемного проектирования и расчетного программного комплекса ANSYS / Л.В. Берлина, Н.В. Солоневич; УГК НТЦ ОАО «БелАЗ». — 11 с.
8. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров: справ. пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 512 с.
9. Работнов, Ю.Н. Сопротивление материалов / Ю.Н. Работнов. — М., Фитматгиз, 1962. — 456 с.
10. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. — М.: Наука, 1970. — 544 с.

Aleksandrov A.A., Algin V.B.

#### Cast-welded heavy-duty mining dump truck frames stressed state evaluation with casting defects consideration

The model which takes into account casting defects (blowholes) in calculation of the stressed state of elements of the mining dump truck frame is proposed. Comparative calculations of the stain-stressed state of the frame elements with and without consideration of casting defects are conducted. It is shown that consideration of the porosity by insertion of hollow fragments in the model qualitatively changes the results of the stress analysis. Size variation of hollow fragments influences on changes of the stressed state in a less degree.

Поступила в редакцию 11.02.2013.