

УДК 622.782.42

## АНАЛИЗ ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА КОЛОСНИКОВ ОБЖИГОВЫХ ТЕЛЕЖЕК ИЗ СТАЛИ 40X24H12СЛ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Иванов Д.И.<sup>1,2</sup>, начальник смены, аспирант (axel-crusader@mail.ru)*

*Кожухов А.А.<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Металлургия и металловедение им. С.П. Угаровой»*

*Скляр В.А.<sup>2</sup>, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия и металловедение им. С.П. Угаровой»*

<sup>1</sup> ОАО «Стойленский ГОК»

(309504, Россия, Белгородская обл., Старый Оскол, Юго-западный промрайон, площадка Фабричная, проезд-4)

<sup>2</sup> Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ «МИСиС»

(309516, Россия, Белгородская обл., Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42)

**Аннотация.** Для определения причин снижения эксплуатационного ресурса колосников обжиговых тележек из стали 40X24H12СЛ выполнен сравнительный анализ результатов макроисследований колосников после эксплуатации с результатами моделирования условий их эксплуатации. Моделирование проведено с применением метода конечных элементов, что позволило достичь высокой достоверности полученных результатов. Для этого было задано максимально возможное достоверное количество граничных условий моделирования, полученных как из макроисследований, проведенных ранее, так и из научной литературы. Применение метода конечных элементов позволило определить, что по сечению детали образуется высокий градиент температур с локальными зонами перегрева. Показано, что характер перегрева предскажем и связан с условиями подачи теплоносителя в рабочую зону во время эксплуатации детали. Установлено, что в детали во время эксплуатации локально образуются зоны с большими значениями внутренних напряжений и деформаций. Показана закономерность появления этих зон, сильно зависящая от наличия неоднородностей в структуре детали, а также предположительно связанная с геометрической сложностью отливки. Установлено, что при наличии усадочных раковин все значения напряжений и деформаций резко возрастают, особо высоко растут значения в локальных максимумах. При этом характер распределения локальных зон с высокими значениями напряжений и деформаций при наличии усадочных раковин остается практически неизменным. Анализ характера расположения зон с высокими значениями напряжений и деформаций позволил получить объяснение существующего принципа разрушения колосников трещинообразованием во время эксплуатации. Доказано, что одной из основных причин, вызывающих коробление, растрескивание и изломы колосников обжиговых тележек из стали 40X24H12СЛ является наличие в структуре металла усадочных раковин. В результате моделирования условий эксплуатации описан механизм протекания дефектообразования колосников, полностью совпадающий с результатами макроисследований и наблюдений, полученными во время эксплуатации.

**Ключевые слова:** коробление, излом, трещина, колосники, сталь, дефекты, трещинообразование, эксплуатационный ресурс, температурный градиент, напряжения, деформации, усадочные пустоты, раковины, моделирование, эксплуатация, метод конечных элементов.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-7-536-542

На сегодняшний день одной из основных причин, снижающих эксплуатационный ресурс колосников обжиговых тележек отечественного производства из стали 40X24H12СЛ, является коробление, зачастую сопровождающееся трещинообразованием с последующим изломом [1].

В результате появилась необходимость в проведении исследований в данном направлении, суть которых заключалась в сравнении выводов, полученных при помощи математического моделирования условий эксплуатации и макроанализа бывших в эксплуатации колосников, вышедших в брак в течение одного межремонтного периода (12 месяцев) [2]. Моделирование выполнено с применением метода конечных элементов (МКЭ). Выбор МКЭ обусловлен его способностью отобразить полную достоверную картину с возможностью одновременно решать температурную и прочностную задачи, а также с возмож-

ностью разделения результатов на области для более детального анализа.

С целью выявления дефектов колосников, образующихся в процессе литья (пустоты, неоднородности), которые могут увеличить величину внутренних напряжений, были проведены макроисследования всех колосников, отбракованных на протяжении 12 месяцев эксплуатации на обжиговой машине ОК-306. Все исследуемые колосники эксплуатировались при температурах 20 – 1270 °С при постоянных теплосменах. При этом скорость охлаждения детали после зоны обжига может составлять от 230 до 330 °С/мин [3]. Такая скорость охлаждения вызывает большой градиент температур по сечению колосника, что приводит к появлению в нем внутренних напряжений [4] (сам по себе, колосник имеет большую геометрическую сложность, что только усугубляет процесс). Эти внутренние напряжения могут привести к корб-

лению деталей, а в последствии к трещинам и изломам [4 – 8].

В результате проведенного макроанализа было установлено, что 17 % всех колосников, демонтированных с балок, подвержено короблению и 12 % – трещинообразованию и изломам, при этом 3/4 колосников, подверженных трещинообразованию, имели трещины и изломы, проходящие через замковую часть колосника. Коробление и трещинообразование всех колосников протекает по одному механизму. Все коробленные

колосники деформировались по одной схеме – среднюю часть колосника выгибало вверх, по направлению к горелкам (рис. 1, а). Трещинообразование в колосниках протекало по двум основным принципам: трещинообразование, приводящее к излому замковой части (рис. 2, а) и продольное трещинообразование, имевшее распространение только в горизонтальных плоскостях (рис. 3, в).

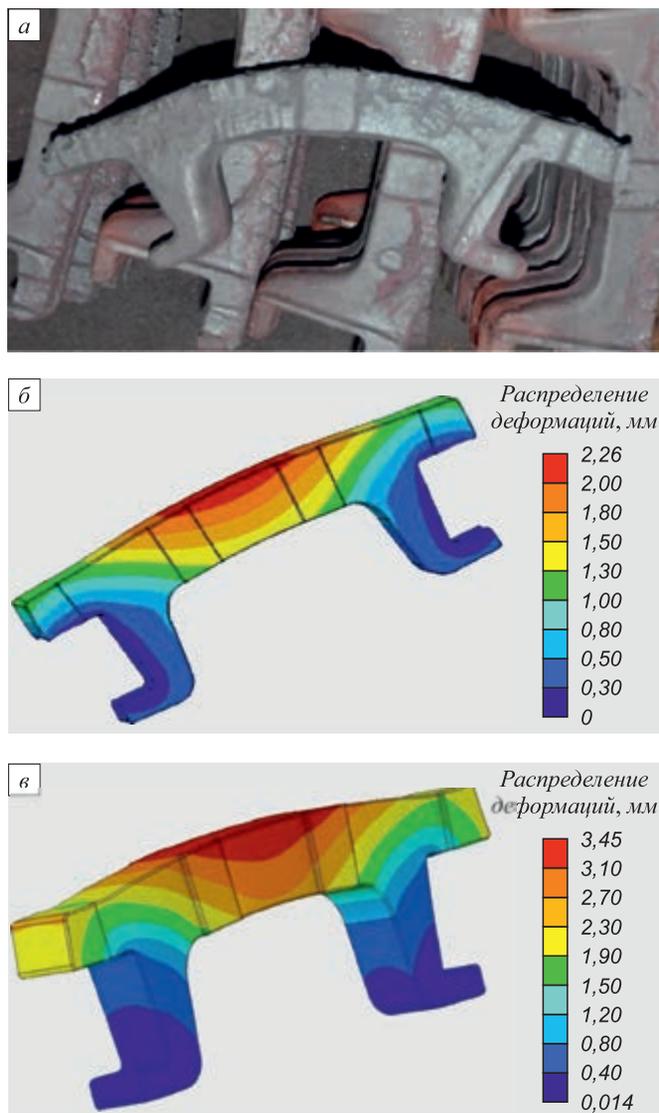


Рис. 1. Механизм коробления колосника: а – коробленный колосник на фоне других колосников, демонтированных с обжиговой тележки после 12 месяцев эксплуатации; б, в – распределение деформаций, возникающих при эксплуатации, по сечению колосников: не имеющих усадочных раковин и с тремя крупными усадочными раковинами соответственно

Fig. 1. The mechanism of buckling deformation of the grate bar: а – buckled grate bar in comparison with other grate bars, dismantled from the pallet car, after 12 months of operation, б and в – distribution of deformation arising upon the operation, along cross section of the grate bars without any cavities and with three large shrinkage cavities respectively

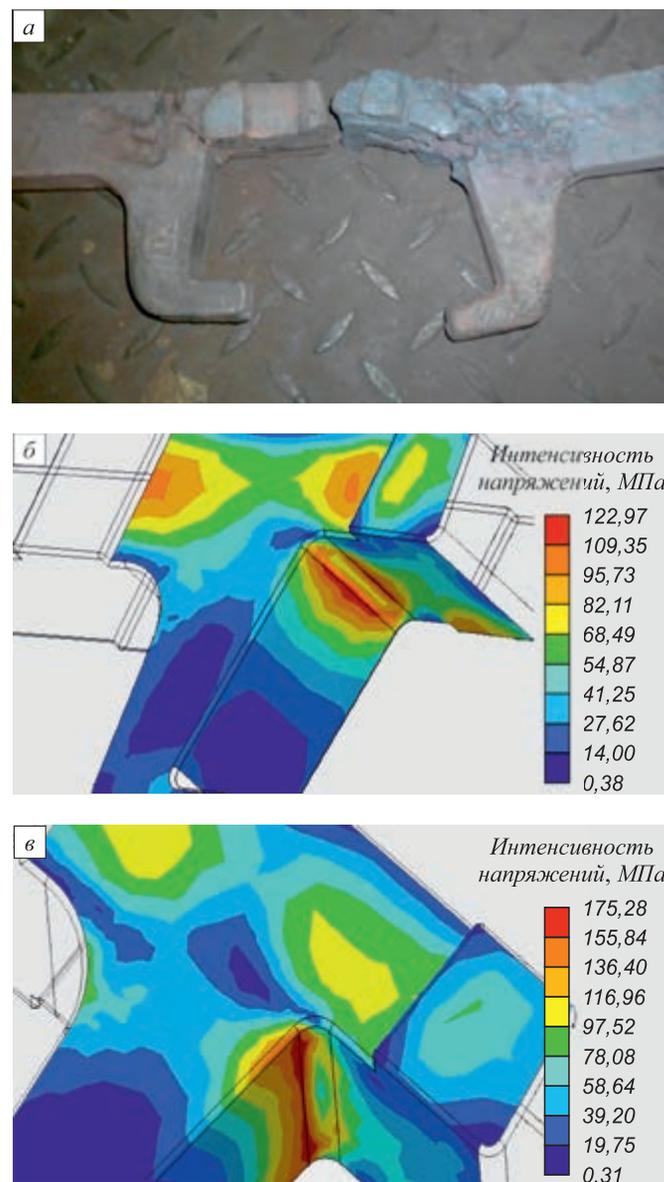


Рис. 2. Механизм излома замковой части колосника: а – демонтированные с балок колосники после 12 месяцев эксплуатации, имеющие изломы замковых частей; б, в – интенсивность напряжений, возникающих при эксплуатации, по сечению колосников: не имеющих усадочных раковин и с тремя крупными усадочными раковинами соответственно

Fig. 2. The mechanism of fracture of crest joint parts of the grate bars: а – the grate bars dismantled from the beams after 12 months of operation having fractures of the crest joint parts, б and в – the stress intensity arising during operation, along the cross section of the grate bars without cavities and with three large shrinkage cavities, respectively

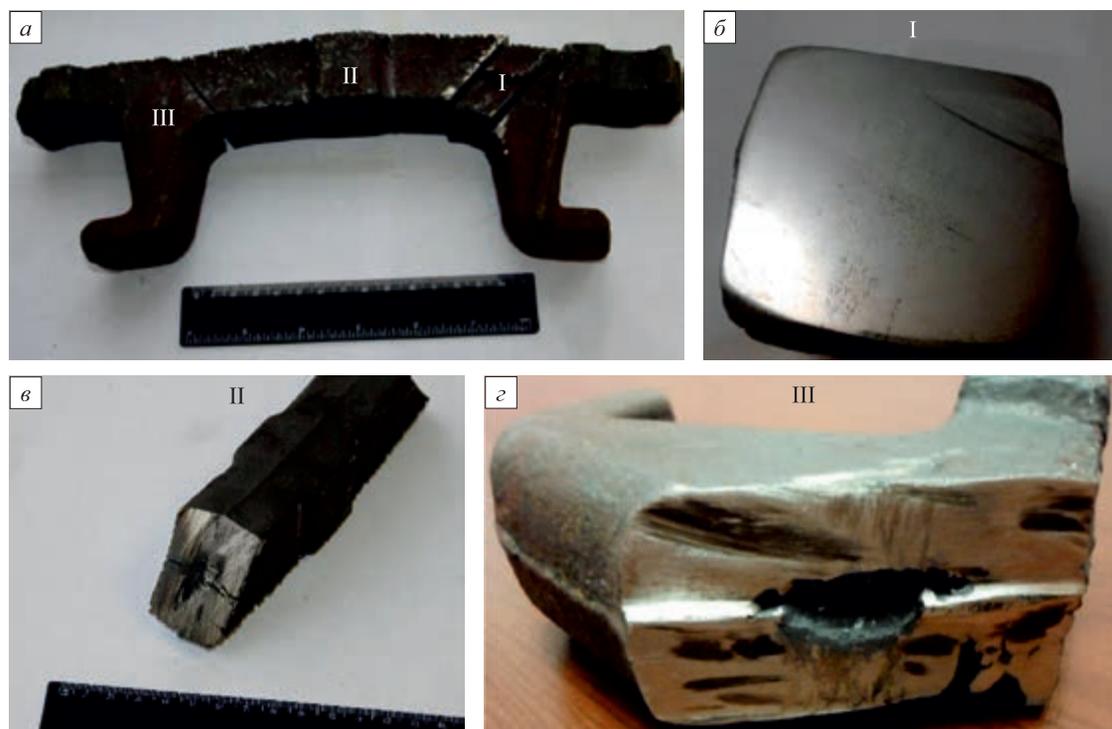


Рис. 3. Исследование колосника, подверженного короблению и трещинообразованию после 12 месяцев эксплуатации: *а* – колосник с обозначениями исследуемых частей, общий вид; *б* (I) – средняя часть колосника, обильно насыщенная усадочными порами; *в* (II) – средняя часть колосника с усадочной раковинной и продольными трещинами; *г* (III) – замковая часть колосника с большой усадочной раковинной

Fig. 3. Examination of the grate bars susceptible to buckling deformation and cracking after 12 months of operation: *a* – grate bar, with specification of the examined pieces, general view; *б* (I) – middle part of the grate bar, heavily charged with shrinkages pores; *в* (II) – middle part of the grate bar with shrinkage cavity and longitudinal cracks; *г* (III) – crest joint part of the grate bars with a large shrinkage cavities

Анализ колосников, проведенный на разных участках детали, показал, что все коробленные колосники были подвержены усадочной пористости и имели большие усадочные раковины. Размер раковин и их расположение во всех случаях были идентичны. Одна из исследуемых деталей представлена на рис. 3, *а*. Самые крупные усадочные раковины находились в массивных участках детали – замковых, по одной с каждой стороны, размер раковин достигал 37×30×18 мм (рис. 3, *г* (III)). При этом, зачастую, в средней части детали находилась значительная по длине усадочная раковина (рис. 3, *в* (II)), размеры которой достигали 98×8×20 мм. Помимо этого, в центре детали обнаружены зоны, обильно насыщенные усадочными порами (рис. 3, *б* (I)). Колосники, не подверженные короблению, имели значительно меньшие усадочные раковины, а также меньшую степень насыщения усадочными порами на тех же участках детали, либо не имели их вовсе.

Известны две причины появления внутренних напряжений в колосниках из стали 40Х24Н12СЛ при эксплуатации (во время термоциклирования): градиент температур по сечению детали и перераспределение объемов в структуре колосника за счет фазовых превращений (карбидообразования и фазового перехода  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ ) [4 – 8]. Учитывая тот факт, что фазовые превра-

щения во всех колосниках при эксплуатации протекают с одинаковой интенсивностью, а дефектообразованию после 12 месяцев эксплуатации подвержены лишь 29 % колосников, а также то, что при нормальных условиях эксплуатации колосники прибывают в зонах высоких температур малый временной промежутки (5 – 7 мин), что меньше времени, необходимого для протекания фазовых превращений, которые могли бы привести к появлению сильных внутренних напряжений [2, 3, 5], можно предположить, что фазовые превращения играют незначительную роль в образовании внутренних напряжений в колосниках обжиговых тележек при эксплуатации.

Исходя из вышеописанных данных, для объяснения причин возникновения коробления и трещинообразования колосников во время эксплуатации было проведено исследование с применением метода конечных элементов, которое заключалось в построении 3D-модели колосника и моделировании условий его эксплуатации, т. е. задании граничных данных. Были приняты следующие условия моделирования:

- геометрические размеры колосника взяты из технологической карты завода изготовителя;
- предусмотрено наличие трех усадочных раковин в теле колосника (две по краям, в замковой части, и одна, протяженная, в центре детали (рис. 4));

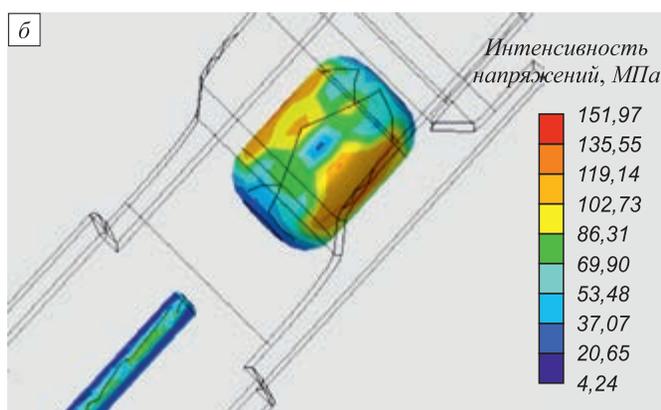
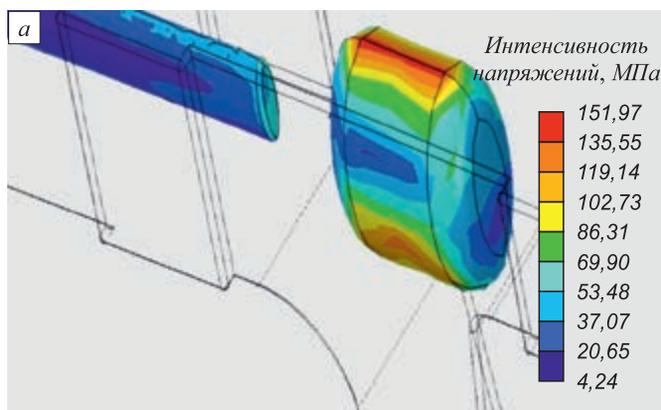


Рис. 4. Интенсивность напряжений, возникающих при эксплуатации внутри металла, расположенного у усадочных раковин: а – вид сбоку (включая верхнюю часть); б – вид снизу

Fig. 4. Stress intensity arising during operation inside the metal located near shrinkage cavities: а – side view (including the top part), б – bottom view

– нагрузка, приходящаяся на верхнюю поверхность колосника: 15,140 кг (исходя из расчета веса максимального объема окатышей, давящих на деталь при максимальной высоте слоя окатышей);

– температура на поверхности контакта колосника с окатышами 1250 °С [9 – 13];

– температура окружающей среды 600 °С [9 – 13];

– ограничения степеней свободы, обусловленные условиями установки колосника на решетку [1];

– время нахождения детали в зоне высоких температур 5 мин (соответствует среднему времени нахождения колосника в зоне обжига при его эксплуатации).

Исследование заключалось в определении величин температурных градиентов, суммарных напряжений в различных участках детали и степеней деформации в колоснике во время эксплуатации.

Из анализа построенной модели градиента температур по сечению детали во время эксплуатации (рис. 5) следует, что наибольшему прогреву (до температур 880 – 1200 °С) подвергается верхняя часть детали, при этом замковая часть имеет высокий градиент температур: от 624 °С на нижних до 1200 °С на верхних поверхностях детали. Учитывая, что процесс выделения

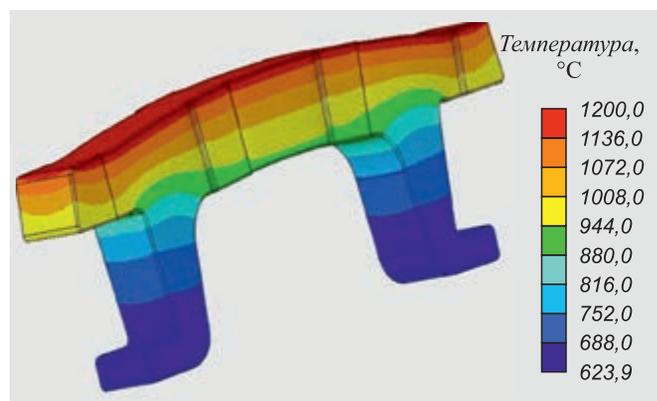


Рис. 5. Распределение температур по сечению колосника после прохождения зоны обжига

Fig. 5. Temperature distribution over the cross section after passing through the firing zone

карбидов начинается от температур 550 °С и получает наибольшее развитие при температурах 750 – 950 °С [1, 14 – 20], можно сделать заключение, что в результате эксплуатации создаются благоприятные условия для выделения карбидов в структуре стали, что подтверждает выводы о протекании обильного карбидообразования при эксплуатации колосников, полученные ранее [1].

Анализ деформаций и интенсивностей напряжений, возникаемых при температурном расширении колосников, выполнен на двух моделях: в колосниках без усадочных раковин и с ними.

В колосниках без усадочных раковин (рис. 1, б) величина деформации увеличивается от периферии к центру детали и в пике составляет от 2 до 2,26 мм. В колосниках, имеющих усадочные раковины (рис. 1, в), деформации распределены таким же образом, но имеют большие значения – от 2,3 до 3,45 мм в пике. В колосниках с усадочными раковинами зоны деформаций с величинами более 2 мм имеют значительно больший объем по сравнению с колосниками без усадочных раковин. Максимальные деформации в центре, при наличии усадочных раковин, увеличились на 52 % и составили от 3,1 до 3,45 мм. Полученная модель коробления колосников, имеющих усадочные раковины, при эксплуатации (рис. 1, в) имеет полное сходство с реальной картиной коробления детали (рис. 1, а). Исходя из этого, следует, что причиной коробления колосников при эксплуатации являются усадочные раковины, которые увеличивают внутренние напряжения в детали во время ее термоциклирования.

Распределение интенсивности напряжений по сечению колосника без усадочных раковин (рис. 2, б) показало, что зоны максимальных напряжений расположены в замковой части, что может быть связано с геометрической сложностью отливки. Интенсивность напряжений в этих зонах находится в пределах от 68,49 до 122,97 МПа, а в остальных участках детали в пределах

от 0,38 до 95,73 МПа. Таким образом, зона максимальной интенсивности напряжений находится в замковой части отливки (в углах, по краям) и имеет пиковые значения более чем на 28 % выше, чем во всех остальных участках детали. Схема распределения интенсивности напряжений по сечению колосника с тремя усадочными раковинами (рис. 2, в) имеет аналогичный вид. Однако в зонах максимальных напряжений интенсивность напряжений возросла и составляет от 58,64 до 175,28 МПа в замковой части, при этом в остальных участках детали интенсивность напряжений находится в пределах от 0,31 до 116,96 МПа. Таким образом, пиковые напряжения в замковой части возросли более чем на 42 % при том, что в остальных участках детали выросли в среднем на 22 % по отношению к результатам моделирования колосника без усадочных раковин.

Вышеописанная модель распределения напряжений позволила объяснить такой распространенный дефект колосников обжиговых тележек, как трещинообразование (приводящее к излому) в замковой части (рис. 2, а). Установлено, что зона максимальных избыточных напряжений образуется в замковой части, что также совпадает с экспериментальными данными [21]. Из-за наличия усадочных пустот и, как показано ранее, коробления, в следствии наличия избыточных напряжений в замковой части колосника, в этой зоне образуется трещина. Дальнейшая эксплуатация такого колосника приводит к распространению трещины и, в конечном итоге, излому замковой части детали. В колосниках, не имеющих в своей структуре усадочные пустоты, напряжения в этих участках детали имеют значительно меньшие значения. Можно предположить, что чем большие размеры и распространение имеют усадочные раковины в колосниках, тем выше внутренние напряжения при их эксплуатации. Вышеописанный механизм более точно описывает процесс протекания излома и доказывает, что усадочные пустоты увеличивают склонность колосников обжиговых тележек к трещинообразованию. Стоит отметить, что защемление колосникового ряда искривленными в процессе эксплуатации подколосниковыми балками является не единственной и не основной причиной образования данного дефекта, как это предполагалось в работе [2].

Анализ интенсивности напряжений, возникающих при эксплуатации колосников в области металла, прилегающего к усадочным раковинам, показал, что внутри больших раковин округлой формы, расположенных в замковых частях колосника, имеются три зоны с интенсивностью напряжений резко выше, чем во всех остальных участках. Одна зона находится сверху усадочной раковины (рис. 4, а) и две зоны внизу раковины (рис. 4, б). Интенсивность напряжений в этих зонах составляет от 86,31 до 151,97 МПа при том, что в остальных участках она находится в пределах от 4,24 до 86,31 МПа. Исходя из этого, следует, что в усадоч-

ных раковинах существуют разноориентированные зоны с интенсивностью напряжений выше на 76 %, чем в остальных участках металла, прилегающего к усадочным раковинам. Полученная модель распределения интенсивности напряжений показывает, что причиной образования продольных трещин колосников обжиговых тележек при эксплуатации (рис. 3, в) является наличие в последних пустот усадочного происхождения. Это также объясняет протекание трещинообразования по принципу, отличному от описанного в работе [22]: трещины должны иметь направление, перпендикулярное к плоскости действия основных растягивающих напряжений при эксплуатации. В случае с колосниками, направление трещин совпадает с плоскостью основных растягивающих напряжений, что объясняется наличием зон с большой интенсивностью напряжений внутри усадочных раковин колосника.

После построения 3D-модели колосника во время эксплуатации были получены графические и количественные результаты, которые в полном объеме отразили и объяснили существующую картину дефектообразования, полученную в результате анализа подверженных короблению и трещинообразованию колосников, демонтированных после эксплуатации на обжиговой машине ОК-306.

**Выводы.** В процессе проведенных исследований и моделирования с применением метода конечных элементов бывших в эксплуатации колосников обжиговых тележек получены следующие результаты:

- при эксплуатации колосников обжиговых тележек в них образуется сильный градиент температур, верхняя зона колосника при эксплуатации прогревается до температур, достаточных для протекания процесса карбидообразования;
- трещинообразование и коробление колосников протекает по одному механизму, что в большей степени определяется размерами и расположением усадочных пустот;
- описан механизм протекания коробления колосников обжиговых тележек: дефект развивается из-за наличия избыточных деформационных напряжений в центре детали, а наличие усадочных пустот резко увеличивает склонность колосников к короблению;
- описан механизм протекания разноориентированного трещинообразования и изломов колосников: протекание процесса обусловлено избыточными напряжениями в различных участках детали, которые появились из-за наличия усадочных раковин.

Таким образом, для снижения и возможного исключения процесса появления таких дефектов, как коробление, трещинообразование и изломы замковых частей колосников обжиговых тележек необходимо изменить технологию их изготовления и разливки в сторону устранения (минимизации) возможности появления усадочных пустот в структуре детали, т. е. вывести усадочные пустоты в прибыльную часть отливки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов Д.И., Кожухов А.А., Уразова Л.Ф. Механизм высокотемпературной коррозии жаростойкой хромоникелевой стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 3. С. 180 – 184.
2. Иванов Д.И., Кожухов А.А. Определение и анализ причин раннего выхода из строя колосников обжиговых тележек // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: Матер. XII Всероссийской науч.-практич. конф. – Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 2015. С. 14 – 19.
3. Копоть Н.Н., Воробьев А.Б., Гончаров С.С. и др. Сравнительный анализ теплотехнических схем современных обжиговых конвейерных машин // Сталь. 2010. № 3. С. 8 – 13.
4. Гуляев А.П. Металловедение: Учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. – М.: Металлургия, 1977. – 647 с.
5. Захаров Б.П. Термист. – Свердловск, Москва: Машгиз, Уралосибирское отделение, 1961. – 313 с.
6. Остапенко Н.Н., Криповицкий Н.Н. Технология металлов: Учебник для проф.-тех. училищ. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1970. – 344 с.
7. Стерин И.С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки: Учеб. пособие. – СПб.: Политехника, 2003. – 344 с.
8. Буталов В.А. Технология металлов. – 3-е изд. – М.: Металлургиздат, 1962. – 512 с.
9. Буткарев А.А., Буткарев А.П., Бородин А.А. и др. Опыт эксплуатации модернизированных обжиговых машин ОК-306 Лебединского ГОКа и пути их совершенствования с целью повышения эффективности производства // Сталь. 2005. № 3. С. 7 – 10.
10. Буткарев А.А., Буткарев А.П., Зинчук Б.А. и др. Разработка технологических решений по увеличению производительности обжиговой машины фирмы Лурги // Сталь. 2007. № 6. С. 2 – 6.
11. Буткарев А.А., Буткарев А.П., Жомирук Е.А. и др. Отработка технологических режимов обработки окатышей на модернизированной обжиговой машине ОК-124 // Сталь. 2010. № 3. С. 16 – 19.
12. Буткарев А.А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах // Сталь. 2011. № 5. С. 4 – 8.
13. Буткарев А.А. Оценка реверсивной схемы охлаждения окатышей на обжиговых машинах // Сталь. 2005. № 4. С. 71 – 73.
14. Идельчик Б.М., Лященко А.Е. Защита от коррозии компрессорных машин. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 119 с.
15. Дьяков В.Г., Медведев Ю.С. и др. Легированные стали для нефтехимического оборудования. – М.: Машиностроение, 1971. – 183 с.
16. Семенова И.В., Флорианович Г.М. и др. Коррозия и защита от коррозии. – М.: Физматлит, 2002. – 336 с.
17. Никольс Р.В. Конструирование и технология изготовления сосудов давления: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1975. – 464 с.
18. Колотыркин Я.М. Коррозия и защита от коррозии. Т. 3. – М.: 1974. – 208 с.
19. Зрунек М. Противокоррозионная защита металлических конструкций: Пер. с чешск. Л.М. Левина. – М.: Машиностроение, 1984. – 136 с.
20. Миллер С.А. Ацетилен, его свойства, получение и применение. Т. 1. – Ленинград: Химия, Ленингр. отд-ние, 1969. – 680 с.
21. Иванов Д.И., Кожухов А.А. Механизм коррозионного разрушения жаростойкой хромоникелевой стали // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: Матер. XII Всероссийской науч.-практич. конф. – Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 2015. С. 244 – 249.
22. Гудков А.А. Трещиностойкость стали. – М.: Металлургия, 1989. – 376 с.

Поступила 2 декабря 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 7, PP. 536–542.

## MATHEMATICAL MODELING OF OPERATION OF THE PALLET CARS' GRATE BARS MADE OF STEEL 40Kh24N12SL

D.I. Ivanov<sup>1,2</sup>, A.A. Kozhukhov<sup>2</sup>, V.A. Sklyar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>OJS JSC “Stoilenskii Mining and Processing Works”, Stary Oskol, Belgorod Region, Russia

<sup>2</sup>Ugarov Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISiS”, Stary Oskol, Belgorod Region, Russia

**Abstract.** To determine the reasons that decrease life of the grate bars of pellet cars from steel 40Kh24N12SL during the operation, a comparative analysis of the results of macro-investigations of the grate bars after operation with the results of modeling the operating conditions for the grate was performed. The modeling of the operating conditions was carried out using the finite element method, which allowed achieving high reliability of the obtained results. For the reliability of the modeling results, the maximum possible number of boundary modeling conditions was obtained, obtained from both macro-examples conducted earlier and from the scientific literature. The application of the finite element method made it possible to determine that a high temperature gradient with local overheating zones is formed along the section of the component. It is shown that the nature of overheating is predictable and is related to the conditions of the coolant supply to the working area during operation of the part. It is established that zones with large values of internal stresses and deformations are locally formed during operation. The regularity of appearance of these zones is shown, which highly depends on the presence of inhomogeneities in the structure

of the part, and is also supposedly related to geometric complexity of the casting. It is also established that in the presence of shrinkage shells, all values of stresses and deformations increase sharply, especially in local maximums. In this case, the distribution of local zones with high stresses and deformations in the presence of shrinkage shells remains practically unchanged. An analysis of the location of zones with high stresses and strains made it possible to explain the existing principle of the destruction of the grate by cracking during operation. It is proved that one of the main causes of buckling, cracking and fracture of the grates of the pellet cars made of steel 40Kh24N12SL is the presence of shrinkage shells in the metal structure. As a result of modeling the operating conditions, mechanism of the occurrence of buckling, cracking and fracture of the grates of steel 40Kh24N12SL during operation is described, which completely coincides with the results of macro-investigations and observations obtained during operation.

**Keywords:** buckling deformation, fracture, grate bars, steel, defects, cracking, operating lifetime, temperature gradient, stress, deformation, shrinkage cavities, cavities, modeling, operation, finite elements method.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-7-536-542

### REFERENCES

1. Ivanov D.I., Kozhukhov A.A., Urazova L.F. Mechanism of high-temperature corrosion of heat-resistant chromium-nickel steel. *Iz-*

- vestiya VUZov. *Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 3, pp. 180–184. (In Russ.).
2. Ivanov D.I., Kozhukhov A.A. Identification and analysis of the causes of early shutting-down of pellet cars' grate bars. In: *Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo: materialy Dvenadtsatoi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, s mezhdunarodnym uchastiem* [Modern problems of the mining and metallurgical complex. Science and production: materials of the 12th All-Russian Sci. and Pract. Conf., with int. participation]. Stary Oskol: STI NITU MISiS, 2015, pp. 14–19. (In Russ.).
  3. Kopot' N.N., Vorob'ev A.B., Goncharov S.S., Butkarev A.A., Butkarev A.P. Comparison of heating systems in conveyor roasting machines. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 3, pp. 233–238.
  4. Gulyaev A.P. *Metallovedenie: ucheb. dlya studentov vuzov* [Metal science: Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 647 p. (In Russ.).
  5. Zakharov B.P. *Termist* [Heat treater]. Sverdlovsk, Moscow: Mashgiz, 1961, 313 p.
  6. Ostapenko N.N., Kripovnitkii N.N. *Tekhnologiya metallov: ucheb. dlya professional'no-tekhnicheskikh uchilishch* [Metal Technology: Proc. for vocational schools]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970, 344 p. (In Russ.).
  7. Sterin I.S. *Mashinostroitel'nye materialy. Osnovy metallovedeniya i termicheskoi obrabotki: uchebnoe posobie* [Engineering materials. Fundamentals of metallurgy and heat treatment: Manual]. St. Petersburg: Politehnika, 2003, 344 p. (In Russ.).
  8. Butalov V.A. *Tekhnologiya metallov* [Metal technology]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 512 p. (In Russ.).
  9. Butkarev A.A., Butkarev A.P., Borodin A.A., Zhilin S.N., Malyavin B.Ya. Modernized roasting machines at Lebedinskii GOK Joint Stock Company. *Steel in Translation*. 2005, vol. 35, no. 3, pp. 1–5.
  10. Butkarev A.A., Butkarev A.P., Zinchuk B.A., Zinchuk B.A., Shevchenko A.A., Dvornichenko I.F., Posokhov A.V. Improving the productivity of a Lurgi roasting machine. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 6, pp. 505–509.
  11. Butkarev A.A., Butkarev A.P., Zhomiruk P.A., Martynenko V.V., Grinenko N.V. Pellet heating on modernized OK-124 roasting machine. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 3, pp. 239–242.
  12. Butkarev A.A. Improving the control of pellet heat treatment in conveyor roasting machines. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 5, pp. 395–399.
  13. Butkarev A.A., Butkarev A.P. Evaluation of the reversing scheme of pellet cooling on the firing machines. *Stal'*. 2005, no. 4, pp. 71–73. (In Russ.).
  14. Idel'chik B.M., Lyashchenko A.E. *Zashchita ot korrozii kompressornykh mashin* [Corrosion protection of compressor machines]. Leningrad: Mashinostroenie, 1984, 119 p. (In Russ.).
  15. D'yakov V.G., Medvedev Yu.S. etc. *Legirovannye stali dlya neftekhimicheskogo oborudovaniya* [Alloyed steels for petrochemical equipment]. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 183 p. (In Russ.).
  16. Semenova I.V., Florianovich G.M. etc. *Korroziya i zashchita ot korrozii* [corrosion and corrosion Protection]. Moscow: Fizmatlit, 2002, 336 p.
  17. *Pressure vessel engineering technology*. Nichols R.W. ed. New York: Elsevier, 1971, 603 p. (Russ.ed.: Nichols R.W. *Konstruirovaniye i tekhnologiya izgotovleniya sosudov davleniya*. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 464 p.).
  18. Kolotyркиn Ya.M. *Korroziya i zashchita ot korrozii* [Corrosion and corrosion protection]. Vol. 3. Moscow: 1974, 208 p. (In Russ.).
  19. Zrunek M. *Protivokorrozionnaya zashchita metallicheskih konstruksii* [Corrosion protection of metal structures]. Transl. from Czech. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 136 p. (In Russ.).
  20. Ivanov D.I., Kozhukhov A.A. Mechanism of corrosion destruction of heat-resistant chromium-nickel steel. In: *Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo: materialy Dvenadtsatoi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, s mezhdunarodnym uchastiem* [Modern problems of the mining and metallurgical complex. Science and production: materials of the 12th All-Russian Sci. and Pract. Conf., with int. participation]. Stary Oskol: STI NITU MISiS, 2015, pp. 244–249. (In Russ.).
  21. Gudkov A.A. *Treshchinostoitkost' stali* [Fracture toughness steel]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 376 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**D.I. Ivanov**, Shift Leader, Postgraduate (axel-crusader@mail.ru)  
**A.A. Kozhukhov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair "Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova"  
**V.A. Sklyar**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova"

Received December 2, 2016