

# ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СТАЛИ РАЗРУШЕНИЮ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ

*А.И. ПОПЕЛЮХ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент*

*С.В. ВЕСЕЛОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент*

*Д.Д. МУНКУЕВА<sup>1</sup>, магистрант*

*В.В. ТИМОНИН<sup>2</sup>, канд. техн. наук, зав. лабораторией*

*В.Н.КАРПОВ<sup>2</sup>, научный сотрудник*

*(<sup>1</sup>НГТУ, г. Новосибирск,*

*<sup>2</sup>ИГД СО РАН, г. Новосибирск)*

Поступила 10 марта 2017

Рецензирование 10 апреля 2017

Принята к печати 10 мая 2017

**Попелюх А.И.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Новосибирский государственный технический университет  
e-mail: aip13@mail.

Ресурс работы высокопроизводительных ударных машин, как правило, не превышает нескольких десятков часов машинного времени. Научные исследования показывают, что процесс разрушения деталей горных машин часто инициируют неметаллические включения и внутренние дефекты структуры стали. Одним из наиболее перспективных научных методов оценки влияния неметаллических включений является математическое моделирование. В работе проанализированы размер, форма и морфология неметаллических включений в десяти плавках стали 45. На основании полученных результатов проведено математическое моделирование интенсивности поля напряжений вблизи дефектов различного типа в условиях нагружения образцов динамическим сжатием. Достоверность данных численного моделирования подтверждена измерением фактической величины зональных напряжений первого рода методом рентгеноструктурного анализа. Установлено, что при динамическом сжатии вблизи пор и низкопрочных включений в основном материале формируются области с высоким уровнем локальных напряжений, при этом вблизи высокопрочных включений в граничной области основного материала величина напряжений незначительна. Для изготовления деталей ударных механизмов предложено использовать стали, в структуре которых при выплавке формируются включения, твердость которых превышает твердость матрицы.

**Ключевые слова:** сталь, неметаллические включения, внутренние напряжения, разрушение, надежность.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-67–78

## Введение

В настоящее время наиболее перспективные способы бурения основаны на использовании оборудования ударного действия. Высокая энергия ударных импульсов позволяет эффективно разрушать горную породу, однако одновременно является причиной быстрого разрушения дета-

лей ударных машин, ресурс которых обычно не превышает нескольких десятков часов машинного времени [1]. Традиционно ответственные детали ударных механизмов изготавливают из среднеуглеродистых сталей, которые упрочняют закалкой с последующим низким отпуском. Исследования усталостного разрушения высокопрочных сталей свидетельствуют, что

инициатором процесса часто выступают неметаллические включения и внутренние дефекты структуры [2,3,4]. Появление трещин вблизи включений может быть обусловлено различными факторами: концентрацией напряжений из-за различий в жесткости материала основы и включения; фазовым наклепом и изменением химического состава материала в граничных областях и т. д. Проведенные ранее на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ исследования показали, что в условиях циклического нагружения ударными импульсами сжатия зарубежные стали с низкой загрязненностью неметаллическими включениями по показателю усталостной долговечности более чем в три раза превосходят стали российского производства (при аналогичном химическом составе и сопоставимых прочностных характеристиках) [5, 6, 19]. Однако в условиях массового производства применение дорогостоящих сталей с высокой степенью чистоты является экономически нерациональным. Наиболее целесообразно использование сталей с такой степенью загрязненности включениями, при которой будут обеспечены требуемые технологические и эксплуатационные свойства деталей.

Существуют различные точки зрения о степени влияния морфологии, размера, формы и распределения неметаллических включений на показатели сопротивления стали усталостному разрушению. В ряде научных работ утверждается, что наибольшее влияние на процесс разрушения оказывает тип включений [7, 8]. Другая группа исследователей считает, что в наибольшей степени на свойства стали оказывает форма и распределение включений, а морфология включений играет второстепенную роль [9, 10, 11]. Наличие полярных точек зрения обусловлено тем, что на усталостные свойства стали влияет большое количество факторов: свойства включений и их адгезия с матрицей, характер нагружения, прочностные характеристики основного материала и т. д. Традиционный подход к оценке влияния включений на свойства стали требует подготовки значительного количества экспериментальных образцов и предполагает выплавку сталей заданного уровня загрязненности, что является сложной технологической задачей. Одним из наиболее перспективных научных методов оценки влияния неметаллических

включений является математическое моделирование.

Исследования, выполненные Y. Murakami, T. Endo, A. Заславским, В. Финкелем, М. Штрелем и другими исследователями [11–18], свидетельствуют, что при воздействии растягивающих напряжений зарождение трещин, как правило, происходит на границе включения и матричного материала или в самом материале включения. Затем трещины распространяются в материал основы, после чего происходит окончательное разрушение. Прочность границы включения и матрицы обычно значительно ниже, чем прочность включений и самой матрицы. Таким образом, при приложении внешней растягивающей нагрузки, превышающей прочность граничного слоя, включение становится механически эквивалентным поре или трещине. Данный научный подход экспериментально подтвержден в работах [11, 12]. Однако вышеуказанный принцип не может быть применен для анализа влияния неметаллических включений в условиях действия поля сжимающих напряжений. Даже при условии низкой прочности граничного слоя включение транслирует действие сжимающей силы в основной объем материала, поэтому характер распределения напряжений в граничных с включением областях существенным образом отличается от поля напряжений, создаваемых порой. В научной литературе аспекты влияния неметаллических включений на свойства стали при сжатии в основном оценены во взаимосвязи с технологическими процессами горячей обработки металлов давлением, при этом вопросы усталостного разрушения сталей при циклическом нагружении сжимающими напряжениями, не превышающими предел текучести стали, остаются слабо изученной областью. Цель исследований заключалась в оценке поля интенсивности напряжений вблизи неметаллических включений в условиях воздействия циклических сжимающих напряжений и разработке рекомендаций по применению сталей различной загрязненности для изготовления деталей ударных механизмов.

## Материалы и методы исследования

Оценку влияния неметаллических включений на механические свойства стали в услови-

ях нагружения динамическим сжатием проводили в несколько этапов. На начальном этапе при помощи методов металлографического и микроспектрального анализа были проанализированы размер, форма и морфология неметаллических включений в десяти плавках стали 45, которая находит широкое применение при изготовлении деталей ударных машин. Полученные результаты были использованы в качестве исходных данных для математического моделирования дефектов при расчете интенсивности поля напряжений вблизи включений различного размера, формы и морфологии. На заключительном этапе оценивали достоверность полученных математических моделей рентгеноструктурными исследованиями внутренних напряжений в модельных образцах из технического чистого железа с различным типом дефектов.

Металлографические исследования образцов из различных плавок стали 45 проводили на оптическом микроскопе Carl Zeiss AxioObserver A1m при увеличении от 25 до 1000 крат. Максимальные показатели загрязненности стали для каждого типа включений оценивали по методу Ш1 в соответствии с ГОСТ 1778. Иденти-

фикацию включений осуществляли на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO 50 XVP, оснащенный микроанализатором EDS X-Act.

Численный эксперимент проводили с использованием метода конечных элементов в программном пакете ANSYS Workbench 15.0. Модели с различными типами дефектов были выполнены в программной среде SolidWorks. В центре плоского образца размером  $35 \times 25 \times 3$  мм имитировали (создавали) дефекты цилиндрической и ромбической формы, а также в виде включений строчечного типа (табл. 1). Моделировали нагружение сжимающей силой, действующей параллельно оси образца. Расчетная величина сжимающих напряжений была равна 200 МПа для стали 45 и 105 МПа для армо-железа, что составляет 80 % от условного предела текучести основного материала. Механические свойства стали 45 и армо-железа были предварительно определены экспериментально на измерительном комплексе Instron 3369 в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 25.503–80. Размеры включений варьировали в диапазоне от 200 нм до 2 мм. Внутренний объем дефекта был заполнен пластичным

Таблица 1

## Виды моделируемых включений

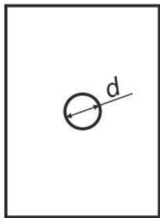
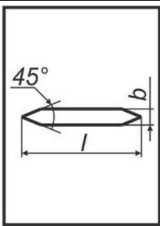
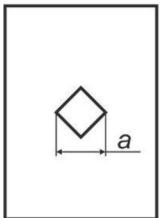
Вид включения	Форма включения	Размер включения	Состав включения
Цилиндр		Диаметр 200 нм, 10 мкм, 50 мкм, 1, мм, 2 мм	Пора (воздух)
			Сульфид марганца
			Оксид алюминия
Строчка		Длина $l = 1000$ мкм, толщина $b = 20$ мкм	Сульфид марганца
Ромб		Длина диагонали $a = 50$ мкм	Пора (воздух)
			Сульфид марганца
			Оксид алюминия

Таблица 2

## Свойства материалов, используемых для математического моделирования

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент термического расширения, 1/°C	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести на сжатие / растяжение, МПа	Предел прочности на сжатие / растяжение, МПа
Сталь 45	7826	0,000012	210	0,28	245 / 245	– / 470
Армко-железо	7826	0,000012	210	0,28	140/140	– / 250
Медь М1	8940	0,0000165	130	0,35	120 / 120	– / 230
MnS	4000	0,0000181	90	0,3	–	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3950	0,000005	367	0,25	300 / 2100	300 / 2100

включением сульфида марганца MnS, твердым оксидом алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или оставался незаполненным (пора). Данные о свойствах включений были получены из литературных источников [9, 15] (табл. 2). В связи с тем что распределение напряжений вблизи включений строчечного типа зависит от ориентации включения относительно направления действия внешней нагрузки, строчечные включения располагали параллельно, перпендикулярно и под углом 45° относительно направления действия внешней сжимающей силы.

Подготовка конечно-элементной модели (построение 3D-модели образца, назначение типа конечных элементов (КЭ) и создание регулярной КЭ-сетки) осуществлялась в программном комплексе ANSYS. Генератором ANSYS Meshing была сформирована гексаэдрическая КЭ-сетка с использованием следующих типов конечных элементов: *Solid bodies* – твердые тела моделировали 8-узловыми тетраэдрами SOLID 45; *Surface bodies* поверхностные тела моделировали 4-узловыми 4-угольными оболочковыми элементами – SHELL 63; *Line bodies* – линейные тела моделировали 2-узловыми линейными элементами LINK 8. Размер конечных элементов варьировался в интервале 50 нм...1 мм. Общее количество элементов (*Elements*) составляло 340 000. При моделировании использовалась модель изотропного поведения тел (*Isotropic Elasticity*). На основании данных [9, 15], приведенных в табл. 2, в совокупности с функционалом компонента системы ANSYS Engineering Data была подго-

товлена база с описанием всего комплекса физико-механических характеристик материалов. Результатом моделирования являлись картины распределения интенсивности полей напряжений вблизи дефектов различной формы, размера и морфологии.

Проверку достоверности данных математического моделирования проводили при помощи рентгеноструктурного анализа зональных напряжений с последующим сравнением результатов с данными математического моделирования. В качестве модельного материала использовали образцы из армко-железа, являющегося гомогенным материалом, у которого в отличие от стали 45 в α-фазе не возникают дополнительные внутренние напряжения, связанные с фазовым наклепом. С целью получения равновесной структуры с минимальным уровнем внутренних напряжений образцы подвергали отжигу в вакуумной печи. Определение напряжений в образцах производилось на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA. Перед съемкой рентгенограмм проводилась подготовка поверхности образцов. После механического шлифования и полирования для удаления наклепанного слоя с анализируемой поверхности проводили дополнительную операцию электрополирования со съемом поверхностного слоя на глубину 400...500 мкм. Напряжения определяли в образцах как в исходном (ненагруженном) состоянии, так и в образцах, подвергнутых одноосевому сжатию. Для создания сжимающих напряжений образцы устанавливали в приспособление (рис. 1)



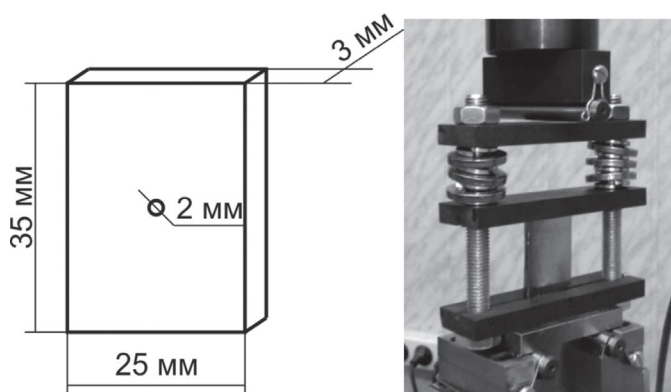


Рис. 1. Схема образца и внешний вид приспособления для создания сжимающих напряжений

и на испытательном комплексе Instron 3369 нагружали сжимающим усилием 8000 Н ( $\sigma_{сж} = 105$  МПа), которое фиксировали затяжкой упругих элементов. Измерение величины напряжений производилась по методу  $\sin^2\psi$ . [19, 20]. Для съемки рентгенограмм использовалась фокусировка по Брэггу–Брентано. Так как методика определения напряжений первого рода предполагает наклон и поворот анализируемой плоскости образца относительно оси гониометра, для исключения дефокусировки на анализируемую поверхность образца наносили эталонный материал, обеспечивающий реперный рефлекс на рентгенограммах. В качестве эталона использовали отожженное сусальное золото, в котором отсутствовали остаточные напряжения. Съемку производили с использованием рентгеновской трубки с хромовым анодом (излучение  $\text{CrK}_{\alpha 1/\alpha 2}$  [5]) при напряжении 40 кВ и токе 30 мА. Углы наклона образца  $\psi$  составили 0, 10, 15, 20, 30, 35, 40, 45 и 50,8°. Образец устанавливали таким образом, чтобы обеспечить измерение напряжений вдоль оси приложения нагрузки. Рентгенограммы, полученные при всех углах  $\psi$ , позволили определить знак и величину главных нормальных напряжений в плоскости образца. Шаг сканирования был равен 0,05°, время накопления в каждой позиции 60 с. Угловой диапазон съемки рентгенограммы  $2\theta$  составлял 150...162° и обеспечивал регистрацию рефлексов семейств плоскостей (211)  $\alpha$  – железа и (222) золота. Анализируемая область на образце представляла собой круг диаметром до 5 мм в непосредственной близости от моделируемого дефекта.

После измерения внутренних напряжений в образцах без дефектов в их центральной части

высверливали сквозное цилиндрическое отверстие диаметром 2 мм, имитирующее пору. Образцы повторно нагружали в приспособлении сжимающей силой, проводили съемку на дифрактометре и определяли уровень внутренних напряжений в исследуемой области вблизи дефекта. На финальной стадии исследования внутрь отверстия без зазора и натяга помещали цилиндр из алюмооксидной керамики, свойства которой аналогичны свойствам твердых неметаллических включений на основе шпинелей  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , или цилиндр из меди марки М1, которая по своим свойствам близка к сульфиду марганца  $\text{MnS}$ . Это позволило моделировать напряженное состояние материала вблизи пустых пор, твердых хрупких или пластичных низкопрочных включений. Затем полученные результаты сравнивали с расчетными данными, полученными в результате математического моделирования.

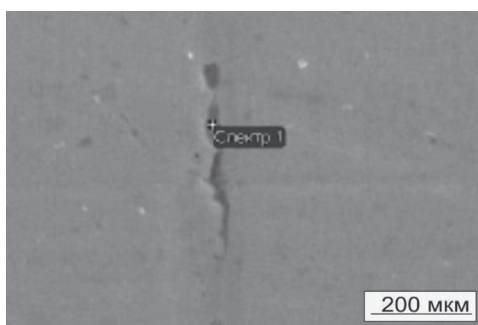
## Результаты исследования

В связи с тем что процесс разрушения обычно инициируют наиболее крупные включения, на начальной стадии исследования были определены максимальные показатели загрязненности и размеры каждого типа включений в десяти плавках стали 45 (табл. 3). Результаты металлографического исследования показывают, что во всех анализируемых образцах присутствуют как точечные включения оксидов, нитридов и силикатов, так и строчечные включения сульфида марганца. Наибольшая степень загрязнения выявлена для включений на основе точечных оксидов и пластичных сульфидов (рис. 2). Размер точечных неметаллических включений достигает 100 мкм. Длина пластичных включений может достигать 1 мм. Кроме включений сферических и строчечных включений в стали обнаружены включения ромбической формы размером до 50 мкм. Результаты микроспектрального анализа показали, что включения сферической формы могут состоять как из оксидов на основе алюминия, железа и магния, так и иметь в своем составе преимущественно сульфид марганца. Включения ромбической формы обладают высокой твердостью и, как правило, имеют сложный химический состав, включающий в себя оксиды алюминия, титана и кальция, а также сульфид марганца. Пластичные вытянутые включения

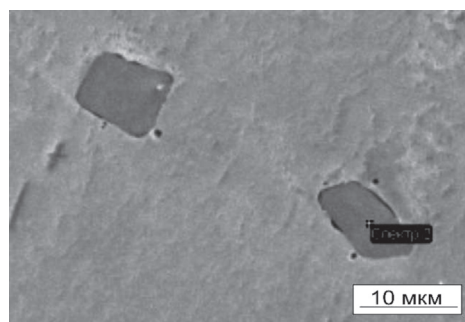
Таблица 3

**Показатели максимальной загрязненности стали 45 включениями различного типа в десяти анализируемых плавках**

Оценка в баллах по ГОСТ 1778 и максимальный размер включений							
Оксиды строчечные	Оксиды точечные	Силикаты хрупкие	Силикаты пластичные	Силикаты недеформирующиеся	Сульфиды пластичные	Нитриды и карбонитриды строчечные	Нитриды и карбонитриды точечные
4б	5а	3б	3а	4б	5а	2а	2а



а



б

Рис. 2. Строчечные (а) и точечные (б) включения в стали 45

состоят преимущественно из сульфида марганца. Результаты металлографических исследований были использованы в дальнейшем для задания параметров математических моделей.

Результаты исследований, проведенных ранее на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ, свидетельствуют, что в условиях многократного динамического сжатия разрушение материала происходит в результате накопления повреждений вблизи дефектов и

концентраторов напряжения [20]. Данные математического моделирования (табл. 4, рис. 3 и 4) позволяют сделать вывод, что даже в условиях сжатия вблизи дефектов в материале формируются локальные области растягивающих напряжений. Максимальный уровень эквивалентных напряжений, равный 2920 МПа, зафиксирован вблизи дефектов строчечного типа в случае их ориентации перпендикулярно действию внешней силы. Вблизи дефектов в форме ромба максимальный расчетный уровень напряжений достигает 680 МПа. На границе дефекта круглой формы максимальная величина эквивалентных напряжений составляют 600 МПа.

Результаты численного эксперимента показывают, что существенное влияние на интенсивность поля напряжений оказывает морфология неметаллических включений. Наибольший уровень эквивалентных напряжений зафиксирован у дефектов в виде пор (табл. 4). Вблизи пластичных неметаллических включений величина эквивалентных напряжений в 1,8...2 раза ниже. Распределение напряжений вблизи жестких и прочных включений оксидов алюминия является принципиально иным. Напряжения локализуются в материале включения, а в основном материале их уровень минимален. Оксидные включения обладают высокой прочностью, поэтому вероятность их разрушения при локализации поля напряжений в материале включения незначительна. Таким образом, на основании расчетных данных можно утверждать, что в условиях нагружения многократным динамическим

Расчетные максимальные значения эквивалентных напряжений вблизи дефектов различного типа

Форма включения	Размер и ориентация	Изменение максимальной величины эквивалентных напряжений в стали 45 и материале включения (при среднем уровне напряжений 200 МПа)					
		Образец с порой		Образец с включением $Al_2O_3$		Образец с включением MnS	
		в основном материале, МПа	в материале дефекта, МПа	в основном материале, МПа	в материале дефекта, МПа	в основном материале, МПа	в материале дефекта, МПа
Круглая	200 мкм	+378	–	–34	+148	+110	–54
	50 мкм	+376	–	–30	+128	+110	–54
	10 мкм	+400	–	–28	+108	+116	–56
	1 мкм	+374	–	–40	+140	+110	–60
	200 нм	+378	–	–30	+150	+110	–60
Ромбическая	50 мкм	+680	–	–46	+140	+130	–20
Строчечная	0°	+2720	–	*	*	+120	–42
	45°	+2360	–	*	*	+90	–16
	90°	+154	–	*	*	+50	–96

\* Моделирование не проводили, так как в стали дефекты подобного типа не встречаются

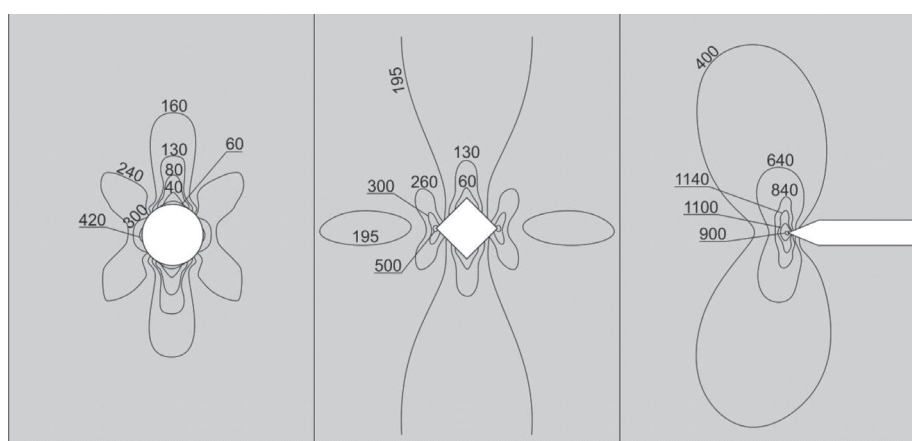


Рис. 3. Поле интенсивности напряжений вблизи полого дефекта различной формы

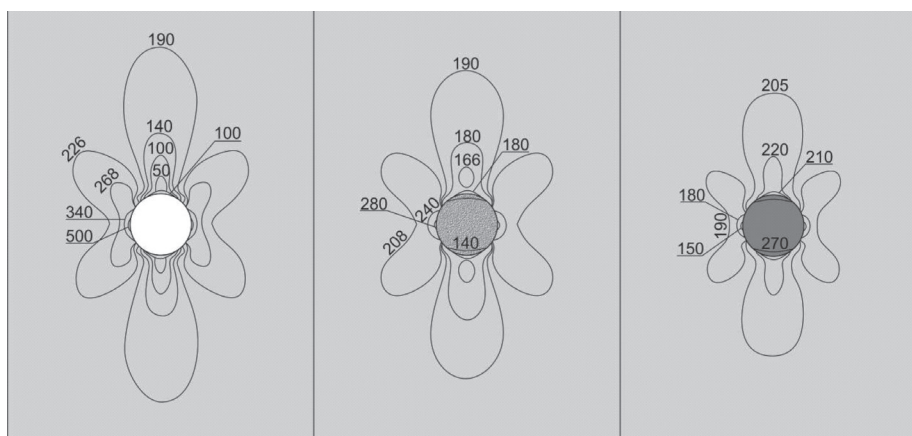


Рис. 4. Распределение полей интенсивности напряжений вблизи включений различного типа:

*а* – пустое отверстие; *б* – твердое включение  $Al_2O_3$ ; *в* – мягкое включение  $MnS$

сжатием у дефектов в виде пор и пластичных низкопрочных включений возникают локальные напряжения высокого уровня, которые могут являться причиной зарождения и распространения усталостных трещин в стали. Высокие показатели долговечности детали ударных машин, работающих в условиях динамического сжатия, могут быть обеспечены в случае применения сталей, в структуре которых при выплавке формируются включения, твердость которых превышает твердость матрицы или высокочистых сталей с малым содержанием неметаллических включений.

Для проверки достоверности данных численного эксперимента был использован метод рентгеноструктурного анализа зональных напряжений первого рода. В образцах из технического чистого железа последовательно создавали различные типы дефектов и проводили оценку напряженно-деформированного состояния.

Результаты рентгеноструктурного анализа подтверждают достоверность результатов математического моделирования (табл. 5). В ненагруженных образцах зафиксированный максимальный уровень напряжений составлял 5 МПа, что не превышало погрешность используемого рентгенографического метода. В сжатом состоянии в образце без дефекта измеренное фактическое значение напряжений составляло 95 МПа при расчетном уровне напряжений, равном 105 МПа. Как уже было отмечено ранее, метод не позволяет определять внутренние напряжения в непосредственной близости от границы дефекта, поэтому зафиксированная величина локальных напряжений отличалась от максимальных расчетных значений. Вблизи пустого отверстия цилиндрической формы при расчетном значении 165 МПа зафиксирован уровень напряжений, равный 158 МПа, что на 50 % превышает средний показатель по сечению образца. В образце

Таблица 5

**Фактические и расчетные значения напряжений в образцах из армко-железа с различным типом дефектов**

Форма включения	Размер и ориентация	Значение локальных напряжений в исследуемой области образца (при среднем уровне эквивалентных напряжений 105 МПа)					
		Пора		Дефект с керамикой $Al_2O_3$		Дефект с медью М1	
		расчет, МПа	факт, МПа	расчет, МПа	факт, МПа	расчет, МПа	факт, МПа
Круглая	2 мм	165	158	86	82	140	128





с отверстием, заполненным медью, был зарегистрирован уровень напряжений в 128 МПа. Согласно результатам расшифровки рентгенограмм при заполнении отверстия алюмооксидной керамикой и нагружении образца сжимающей силой величина напряжений в стали в месте измерения составляла 82 МПа, что приблизительно на 20 % меньше среднего уровня напряжений в основном материале. Таким образом, результаты рентгеновской дифрактометрии подтверждают предположение, что в условиях сжатия наличие в стали пор и пластичных низкопрочных включений приводит к значительному росту локальных напряжений в основном материале вблизи дефектов. Уровень локальных напряжений вблизи твердых высокопрочных включений ниже среднего показателя напряжений в стали.

### Выводы

1. Выпускаемая в настоящее время сталь 45 содержит в своей структуре значительное количество неметаллических включений, преимущественно в виде точечных оксидов и пластичных сульфидов. Размер точечных неметаллических включений достигает 100 мкм, длина пластичных включений может достигать 1 мм.

2. В условиях динамического сжатия морфология включений оказывает значительное влияние на характер поля интенсивности напряжений, возникающих вблизи неметаллических включений и дефектов в стали, поэтому применение подхода, при котором в расчетах включение принимается механически эквивалентным поре или трещине при данном виде нагружения является неправомерным.

3. Результаты математического моделирования и рентгеноструктурного анализа зональных напряжений показали, что при динамическом сжатии вблизи пор и низкопрочных включений в основном материале формируются области с локальными напряжениями, величина которых может превышать предел текучести стали. Распределение напряжений вблизи жестких и прочных включений оксидов алюминия является принципиально иным. Напряжения максимального уровня локализируются в материале включения, при этом в граничной области основного материала величина напряжений невысока.

4. Для изготовления деталей горных машин, работающих в условиях многократного циклического нагружения сжатием, предпочтительно применение сталей, в структуре которых при выплавке формируются включения, твердость которых превышает твердость матрицы, или применение высокочистых сталей с малым содержанием неметаллических включений.

### Список литературы

1. Downhole high-pressure air hammers for open pit mining / A.A. Repin, B.N. Smolyanitsky, S.E. Alekseev, A.I. Popelyukh, V.V. Timonin, V.N. Karpov // *Journal of Mining Science*. – 2014. – Vol. 50, no. 5. – P. 929–937. – doi: 10.1134/S1062739114050123.
2. Murakami Y., Nomoto T., Ueda T. Factors influencing the mechanism of superlong fatigue failure in steels // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. – 1999. – Vol. 22, iss. 7. – P. 581–590. – doi: 10.1046/j.1460-2695.1999.00187.x.
3. Bergengren Y., Larsson M., Melander A. The influence of machining defects and inclusions on the fatigue properties of a hardened spring steel // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. – 1995. – Vol. 18, iss. 10. – P. 1071–1087. – doi: 10.1111/j.1460-2695.1995.tb00840.x.
4. Estimation of maximum inclusion size and fatigue strength in high-strength ADF1 steel / J.M. Zhang, J.F. Zhang, Z.G. Yang, G.Y. Li, G. Yao, S.X. Li, W.J. Hui, Y.Q. Weng // *Materials Science and Engineering: A*. – 2005. – Vol. 394, iss. 1–2. – P. 126–131. – doi: 10.1016/j.msea.2004.11.015.
5. Influence of nonmetallic inclusions on endurance of percussive machines / A.A. Repin, S.E. Alekseev, A.I. Popelyukh, A.M. Teplykh // *Journal of Mining Science*. – 2011. – Vol. 47, iss. 6. – P. 798–807. – doi: 10.1134/S1062739147060128.
6. Исследование конструктивной прочности материалов после комбинированного упрочнения и специальных видов сварки / А.В. Плохов, А.И. Попелюх, С.В. Веселов, А.Г. Тюрин, А.А. Никулина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 392 с. – ISBN 978-5-7782-2635-7.
7. Influence of inclusion size on fatigue behavior of high strength steels in the gigacycle fatigue regime / J.M. Zhang, S.X. Li, Z.G. Yang, G.Y. Li, W.J. Hui, Y.Q. Weng // *International Journal of Fatigue*. – 2007. – Vol. 29, iss. 4. – P. 765–771. – doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.06.004.
8. Dominguez G.M.A. Prediction of very high cycle fatigue failure for high strength steels, based on the inclusion geometrical properties // *Mechanics of Materials*. – 2008. – Vol. 40, iss. 8. – P. 636–640. – doi: 10.1016/j.mechmat.2008.03.001.

9. On the critical inclusion size of high strength steels under ultra-high cycle fatigue / Z.G. Yang, J.M. Zhang, S.X. Li, G.Y. Li, Q.Y. Wang, W.J. Hui, Y.Q. Weng // *Materials Science and Engineering: A*. – 2006. – Vol. 427, iss. 1–2. – P. 167–174. – doi: 10.1016/j.msea.2006.04.068.
10. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Оженко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. – М.: Металлургия, 1980. – 284 с.
11. Murakami Y. Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions. – Amsterdam: Elsevier, 2002. – 369 p. – ISBN 9780080440644.
12. Influence of non-metallic inclusions on the fatigue properties of heavily cold drawn steel wires / K. Lambrighs, I. Verpoest, B. Verlinden, M. Wevers // *Procedia Engineering*. – 2010. – Vol. 2, iss. 1. – P. 173–181. – doi: 10.1016/j.proeng.2010.03.019.
13. Lankford J. Initiation and early growth of fatigue cracks in high strength steel // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1977. – Vol. 9, iss. 3. – P. 617–624. – doi: 10.1016/0013-7944(77)90074-1.
14. The fatigue behaviors of zero-inclusion and commercial 42CrMo steels in the super-long fatigue life regime / Z.G. Yang, S.X. Li, J.M. Zhang, J.F. Zhang, G.Y. Li, Z.B. Li, W.J. Hui, Y.Q. Weng // *Acta Materialia*. – 2004. – Vol. 52, iss. 18. – P. 5235–5241. – doi: 10.1016/j.actamat.2004.06.031.
15. Заславский А.Я. Современные автоматные стали. Состав, включения, свойства. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 205 с. – ISBN 5-696-03332-6.
16. Шлис Х.И. Поведение неметаллических включений в стали при кристаллизации и деформации. – М.: Металлургия, 1971. – 125 с.
17. Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 359 с.
18. Штрель М.А. Прочность сплавов. Ч. 1. Дефекты решетки. – М.: Металлургия, 1982. – 280 с.
19. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: МИСИС, 2002. – 360 с. – ISBN 5-87623-096-0.
20. Комяк Н.И., Мясников Ю.Г. Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений. – Л.: Машиностроение, 1972. – 87 с.
21. Specific features of the nucleation and growth of fatigue cracks in steel under cyclic dynamic compression / A.I. Popelyukh, P.A. Popelyukh, A.A. Bataev, A.A. Nikulina, A.I. Smirnov // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2016. – Vol. 117, iss. 3. – P. 279–287. – doi: 10.1134/S0031918X1603011X.

## ОБРАБОТКА METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (75), April – June 2017, Pages 67–78

### Influence of nonmetallic inclusions on the fracture resistance of steel under fatigue dynamic compression conditions

**Popelyukh A. I.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: aip13@mail.ru  
**Veselov S. V.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: veselov\_s@inbox.ru  
**Munkueva D. D.**<sup>1</sup>, Master's Degree student, e-mail: 19darima94@mail.ru  
**Timonin V. V.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Engineering), Head of Laboratory, e-mail: timonin2005@ngs.ru  
**Karpov V. N.**<sup>2</sup>, Researcher, e-mail: kvn184@yandex.ru

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>2</sup>Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the RAS, 54 Krasny ave., Novosibirsk, 630091, Russian Federation

#### Abstract

Impact machines are one of the most productive types of equipment for the rock destruction. They provide high drilling speed but generally have low durability and reliability. Modern researches show that the process of mining machines parts fracture often is initiated by nonmetallic inclusions and internal defects in the structure of steel. However, nowadays the question concerning the degree of the influence of the nonmetallic inclusions morphology, size, shape and distribution on the steel fatigue failure resistance is still not clear. The traditional approach to solving the problem of the inclusions influence on steel properties requires the preparation of a significant number of experimental samples, so mathematical modeling is a promising method for assessing the influence of nonmetallic inclusions. The purpose of the research was to estimate the stresses intensity field near nonmetallic inclusions under

the influence of cyclic compressive stresses and to develop recommendations for the usage of steels with various impurities for the impact machines parts manufacture. The effect of nonmetallic inclusions under dynamic loading conditions was evaluated in several stages. At the initial stage, using the methods of metallographic and microspectral analysis, the size, shape and morphology of nonmetallic inclusions in ten melt of 45 steel were determined. The obtained results were used as input data for the software package ANSYS Workbench 15.0 for calculating the stress field intensity the near inclusions. The reliability of the obtained mathematical models was checked by measuring the internal stresses by the X-ray diffraction analysis with ARL X'TRA diffractometer. Metallographic studies have shown that the main types of inclusions in the steel are point oxides, whose size can reach up to 100 microns and plastic sulphides up to 1 mm in length. The results of numerical simulation show that under dynamic compression conditions an application of the approach in which the inclusion is assumed to be mechanically equivalent to the pore or crack is incorrect. Under the dynamic compression condition near the pores and low-strength inclusions in the base material regions with a high level of local stresses are formed. The maximum value of the equivalent stresses was revealed near the elongated defects in the case of their orientation perpendicular to the action of the external force. Stress distribution near hard and strong oxides inclusions is significantly different. The maximum stresses are localized in the inclusion, while the stress magnitude is insignificant in the boundary region between the inclusion and base material. To verify the reliability of the data of the numerical experiment, XRD analysis was used for zonal stresses measuring. The results of X-ray diffractometry confirm the assumption that under compression conditions the presence of pores in the steel and plastic low-strength inclusions leads to a 50 % increase of local stresses of the main material near the defects. The stress level near the solid high-strength inclusions in the base material is 20 % lower than the average level. The results of the research show that it is desirable to make the details of impact machines using the steels whose structure contains inclusions which hardness exceeds the hardness of the matrix or apply high-purity steels with a low content of nonmetallic inclusions.

### Keywords

steel, impact machines, dynamic compression, nonmetallic inclusions, X-ray diffraction.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-2-67-78

### References

1. Repin A.A., Smolyanitsky B.N., Alekseev S.E., Popelyukh A.I., Timonin V.V., Karpov V.N. Downhole high-pressure air hammers for open pit mining. *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 929–937. doi: 10.1134/S1062739114050123.
2. Murakami Y., Nomoto T., Ueda T. Factors influencing the mechanism of super long fatigue failure in steels. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1999, vol. 22, iss. 7, pp. 581–590. doi: 10.1046/j.1460-2695.1999.00187.x.
3. Bergengren Y., Larsson M., Melander A. The influence of machining defects and inclusions on the fatigue properties of a hardened spring steel. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1995, vol. 18, iss. 10, pp. 1071–1087. doi: 10.1111/j.1460-2695.1995.tb00840.x.
4. Zhang J.M., Zhang J.F., Yang Z.G., Li G.Y., Yao G., Li S.X., Hui W.J., Weng Y.Q. Estimation of maximum inclusion size and fatigue strength in high-strength ADF1 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 394, iss. 1–2, pp. 126–131. doi: 10.1016/j.msea.2004.11.015.
5. Repin A.A., Alekseev S.E., Popelyukh A.I., Teplykh A.M. Influence of nonmetallic inclusions on endurance of percussive machines. *Journal of Mining Science*, 2011, vol. 47, iss. 6, pp. 798–806. doi: 10.1134/S1062739147060128.
6. Plokhov A.V., Popelyukh A.I., Veselov S.V., Tyurin A.G., Nikulina A.A. *Issledovanie konstruktivnoi prochnosti materialov posle kombinirovannogo uprochneniya i spetsial'nykh vidov svarki* [Research into structural strength of materials after combined hardening and special kinds of welding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2015. 392 p. ISBN 978-5-7782-2635-7.
7. Zhang J.M., Li S.X., Yang Z.G., Li G.Y., Hui W.J., Weng Y.Q. Influence of inclusion size on fatigue behavior of high strength steels in the gigacycle fatigue regime. *International Journal of Fatigue*, 2007, vol. 29, iss. 4, pp. 765–771. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.06.004.
8. Dominguez G.M.A. Prediction of very high cycle fatigue failure for high strength steels based on the inclusion geometrical properties. *Mechanics of Materials*, 2008, vol. 40, iss. 8, pp. 636–640. doi: 10.1016/j.mechmat.2008.03.001.
9. Yang Z.G., Zhang J.M., Li S.X., Li G.Y., Wang Q.Y., Hui W.J., Weng Y.Q. On the critical inclusion size of high strength steels under ultra-high cycle fatigue. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 427, iss. 1–2, pp. 167–174. doi: 10.1016/j.msea.2006.04.068.

10. Yavoiskii V.I., Rubenchik Yu.I., Okenko A.P. *Nemetallicheskie vklyucheniya i svoistva stali* [Nonmetallic inclusions and properties of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 284 p.
11. Murakami Y. *Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions*. Amsterdam, Elsevier, 2002. 384 p. ISBN 9780080440644.
12. Lambrighs K., Verpoest I., Verlinden B., Wevers M. Influence of non-metallic inclusions on the fatigue properties of heavily cold drawn steel wire. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, iss. 1, pp. 173–181. doi: 10.1016/j.pro-eng.2010.03.019.
13. Lankford J. Initiation and early growth of fatigue cracks in high strength steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 1977, vol. 9, iss. 3, pp. 617–624. doi: 10.1016/0013-7944(77)90074-1.
14. Yang Z.G., Li S.X., Zhang J.M., Zhang J.F., Li G.Y., Li Z.B., Hui W.J., Weng Y.Q. The fatigue behaviors of zero-inclusion and commercial 42CrMo steels in the super-long fatigue life regime. *Acta Materialia*, 2004, vol. 52, iss. 18, pp. 5235–5241. doi: 10.1016/j.actamat.2004.06.031.
15. Zaslavskii A.Ya. *Sovremennye avtomatnye stali. Sostav, vklyucheniya, svoistva* [Modern automatic steel. Composition, inclusions, properties]. Chelyabinsk, SuSTU Publ., 2005. 205 p. ISBN 5-696-03332-6.
16. Spies H.-J. *Verhalten von nichtmetallischen Einschlüssen im Stahl bei der Erstarrung und Umformung*. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1968 (Russ. ed.: Shpis Kh.I. *Povedenie nemetallicheskich vklyuchenii v stali pri kristallizatsii i deformatsii*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 125 p.).
17. Finkel V.M. *Fizicheskie osnovy tormozheniya razrusheniya* [Physical basis of inhibition of fracture]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 359 p.
18. Shtremel' M.A. *Prochnost' spлавov*. Ch. 1. *Defekty reshetki* [Strength of alloys. Pt. 1. Lattice defects]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 280 p.
19. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. *Rentgenograficheskii i elektronno-opticheskii analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow, MISIS Publ., 2002. 360 p. ISBN 5-87623-096-0.
20. Komyak N.I., Myasnikov Yu.G. *Rentgenovskie metody i apparatura dlya opredeleniya napryazhenii* [X-ray methods and equipment for determining stresses]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 87 p.
21. Popelyukh A.I., Popelyukh P.A., Bataev A.A., Nikulina A.A., Smirnov A.I. Specific features of the nucleation and growth of fatigue cracks in steel under cyclic dynamic compression. *The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, iss. 3, pp. 279–287. doi: 10.1134/S0031918X1603011X.

#### Article history

Received 10 March 2017

Revised 10 April 2017

Accepted 10 May 2017