

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ
СТАЛЕЙ ЛЕДЕБУРИТНОГО КЛАССА
ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ**

Л. С. Хромова

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель И. Н. Степанкин

Введение

Учет влияния текстуры сталей на их прочностные характеристики является общепринятым подходом при разработке технологии изготовления деталей машин. Анизотропия сплава наиболее ярко проявляется при получении заготовок методами обработки давлением. Общепринятым положением является недопущение выхода волокон металла на тяжело нагруженные участки рабочих поверхностей деталей, а также поперечное расположение текстуры по отношению к линии приложения внешнего растягивающего напряжения. В большинстве случаев текстурный рисунок машиностроительных сталей формируется границами зерен металла, которые в процессе заготовительных операций при производстве деталей машин вытягиваются в направлении деформации заготовки. Морфология межзеренных границ характеризуется скоплением мелких неметаллических включений, в первую очередь карбидной природы. В углеродистых, а также экономно-легированных сталях границы не представляют собой отдельной фазы сплава, способной за счет собственных механических характеристик влиять на локальное напряженно-деформированное состояние в многофазном материале. В то же время высоколегированные высокоуглеродистые стали, относящиеся к ледебуритному классу, характеризуются тем, что их текстурный рисунок формируется крупными карбидными включениями, которые зачастую имеют соизмеримые с окружающими зернами размеры. Карбидные частицы, сформированные сильными карбидообразующими элементами – хромом, вольфрамом, ванадием и др., обладают высокой теплостойкостью, полностью не растворяются в аустените в процессе нагрева под закалку. Ликвация, образуемая включениями, особенно эвтектоидными карбидами, неизменно присутствующими в сталях ледебуритного класса, оказывает существенное влияние на их прочность. Согласно данным, приведенным в работе [1], такие стали как P18 и X12M теряют более 30 % своей прочности в случае поперечного расположения волокон в сравнении с продольным. Исследования, проводимые в направлении оценки влияния ориентации волокон сталей на их прочностные характеристики, учитывают в первую очередь расположение частиц по отношению к линии действующего, как правило, растягивающего напряжения. В то же время известно, что монокарбиды, образуемые легирующими элементами высокопрочных сталей, обладают высокими твердостью и модулем упругости [2], [3]. Это позволяет предположить, что сложные по составу первичные эвтектоидные карбиды ледебуритных сталей будут превосходить по отмеченным показателям материал матрицы. Очевидно, что в этом случае приложение внешних нагрузок к композиционному материалу, которым является практически любая сталь ледебуритного класса, приведет к перераспределению напряжений и деформаций в окрестности более упругих включений и вызовет изменение локальной прочности металла. Форма и ориентация включений являются дополнительными факторами,

влиянием которых нельзя пренебрегать при исследовании взаимодействия структурных компонентов высоколегированных инструментальных сталей.

Объекты и методы исследований

Объектом исследований являлась сталь ледебуритного класса со строченым расположением карбидных частиц. Форма карбидных частиц принята овальной, так как по результатам исследований, проведенных в работе [4], выявлены достаточно простые технологические методы, позволяющие преобразовать эллиптическую угловатую форму карбидных частиц, наиболее существенно сказывающуюся на анизотропии материала, в более благоприятную – овальную.

Оценку влияния формы, размеров и свойств включений на напряженно-деформированное состояние в их окрестности осуществляли посредством компьютерного моделирования с применением пакета ANSYS. Деформацию включений и металлической матрицы считали абсолютно упругой. Это соответствует современным представлениям о поведении сталей ледебуритного класса, в частности быстрорежущих, при воздействии на них внешних нагрузок, приводящих к разрушению материала [5]. Модуль упругости металлической матрицы принимали равным $2,26 \times 10^{11}$ Па, что соответствует данному показателю стали Р6М5 [6]. Модуль упругости включений в связи с отсутствием достоверных сведений о свойствах эвтектидных карбидов сталей ледебуритного класса, принимали равным в 1,5, 2 и 2,5 раза большим, чем модуль упругости матрицы. Для учета взаимного влияния соседних карбидных частиц на напряженно-деформированное состояние на границе включение–матрица использовали компьютерную модель из четырех включений, расположенных строчкой. Расстояния между включениями принимали равным 3 мкм, что соответствовало поперечным размерам включений при их длине порядка 18–20 мкм. Морфологию совокупности включений стали ледебуритного класса заимствовали из исследований, проведенных в работе [7]. Величина внешнего напряжения, приложенного к модели материала принималась равной 560 МПа – пределу выносливости стали Р6М5, определенному при симметричном цикле нагружения [8]. Для исследования взаимодействия структурных составляющих материала при знакопеременных нагрузках модель нагружали сжимающими и растягивающими напряжениями поочередно. Создание условий плоского напряженного состояния, соответствующего требованиям линейной механики разрушения твердых материалов, обеспечивали построением компьютерной модели в виде тонкой двумерной пластины. Совокупность включений располагали в непосредственной близости от верхней границы модели, ориентировали параллельно и перпендикулярно внешней границе материала, а также под углом 45 градусов к ней. Внешнее растягивающее и сжимающее напряжение прикладывали к боковым сторонам пластины.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследований показали, что наиболее существенное влияние на концентрацию растягивающих и сжимающих напряжений в теле включений и их окрестности оказывает различие в упругих характеристиках структурных составляющих. Так, включения, модуль упругости которых в 2,5 раза превышает модуль упругости матрицы, создают в своей окрестности знакопеременные напряжения с амплитудой от 694 до 1330 МПа. Наиболее высокие значения растягивающих напряжений возникают в окрестности частиц, расположенных параллельно внешней границе материала. Как видно из рисунка, опасной зоной является тонкая прослойка между соседними включениями. Величина напряжений в теле частиц достигает своего максимального значения – 1290 МПа в случае, когда частицы располагаются эквидистантно к внешней границе материала.

Распределение продольных деформаций в окрестности совокупности включений формирует аналогичную картину. Зонай концентрации максимальных продольных деформаций являются небольшие участки материала матрицы, располагающиеся между включениями. Наиболее высокие деформации величиной до 0,6 % возникают в окрестности самых жестких включений, расположенных параллельно внешней границе материала. При этом величина деформаций в теле включений не превышает 0,23 %, что объясняется высоким модулем упругости частиц. Выявленное значение деформаций превышает уровень деформаций закаленных инструментальных сталей ледебуритного класса, способствующий упрочнению металла наклепом. По данным И. Л. Хейфеца [9], деформация инструментальных сталей ледебуритного класса величиной свыше 0,1 % будет сопровождаться разупрочнением металла.

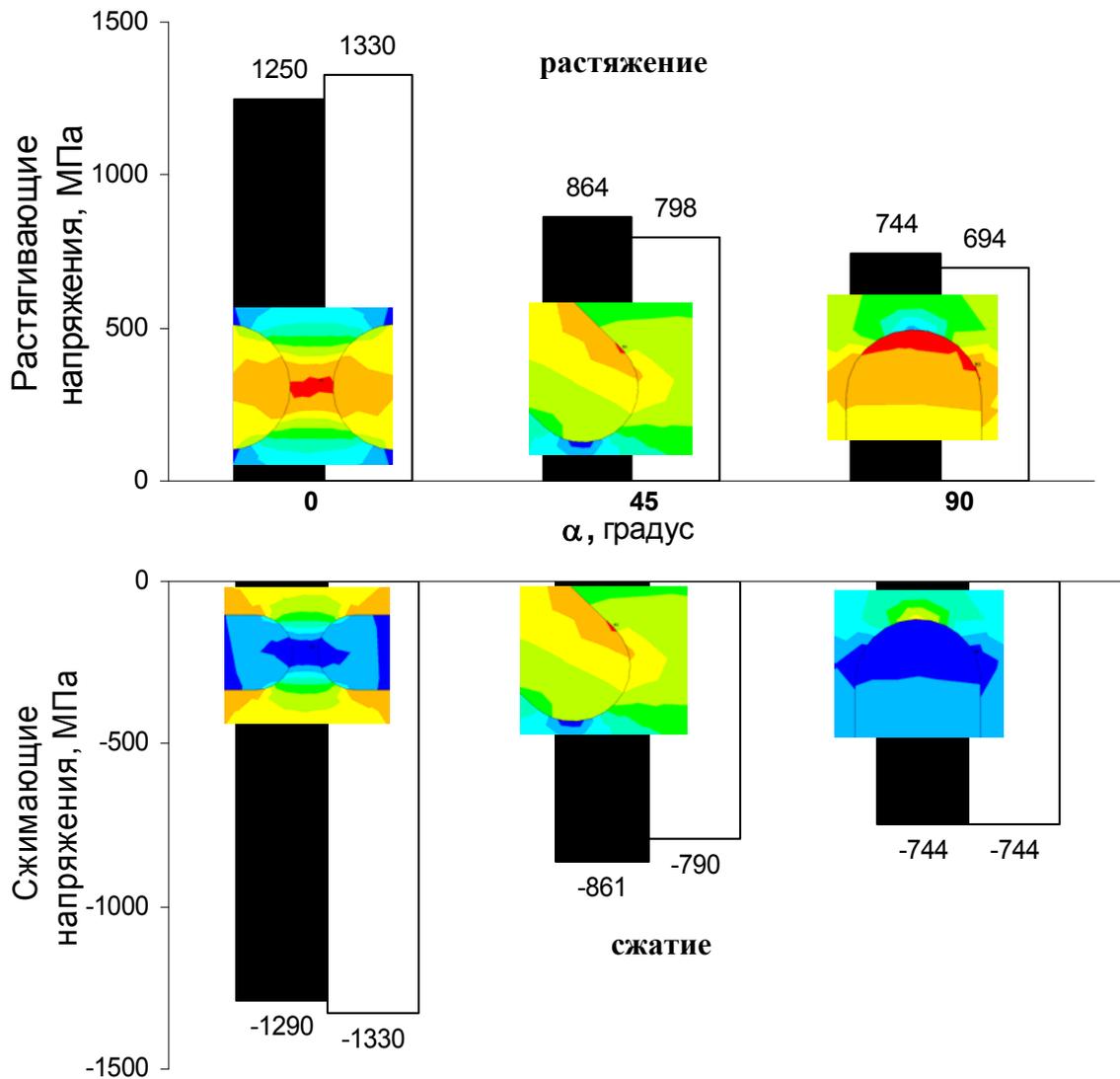


Рис. 1. Главные напряжения, возникающие в фазе растяжения и сжатия в окрестности совокупности включений, модуль упругости которых в 2,5 раза превышает модуль упругости металлической матрицы; α – угол образуемый продольной осью включений и внешней границей модели материала; ■ – напряжения в теле включений, □ – напряжения в окрестности включений

Заключение

Проведенные исследования показали, что текстура высоколегированных сталей ледебуритного класса, формируемая строченым распределением карбидных включений, оказывает существенное влияние на локальное напряженно-деформированное состояние в окрестности избыточных фаз материала. Наиболее высокие по величине знакопеременные напряжения и деформации возникают в окрестности жестких включений, располагающихся параллельно поверхности материала. Армирующая роль соседних включений создает опасное напряженно-деформированное состояние в тонких прослойках материала между ними. Величина напряжений в указанных зонах превышает допустимые значения по критерию деформационного упрочнения материала и будет способствовать зарождению внутрикристаллических дефектов.

Литература

1. Шейнерман, В. М. Стали для штампов холодного деформирования / В. М. Шейнерман. – Рига : Латв. респ. ин-т науч.-техн. информации и пропаганды, 1969. – 40 с.
2. Тот, Л. Карбиды и нитриды переходных металлов / Л. Тот. – М. : Мир, 1974. – 294 с.
3. Сверхтвердые материалы / И. Н. Францевич [и др.] ; под общ. ред. И. Н. Францевича. – Киев : Наукова думка, 1980. – 296 с.
4. Кенько, В. М. Оптимизация технологии изготовления холодновысадочных матриц / В. М. Кенько, В. В. Пинчук, И. Н. Степанкин // Кузнеч.-штамповоч. произ-во. – 1998. – № 11. – С. 22–24.
5. Кремнев, Л. С. Особенности разрушения инструментальных материалов / Л. С. Кремнев // Металловедение и термообработка металлов. – 1994. – № 4. – С. 17–22.
6. Таблицы стандартных справочных данных. Сталь инструментальная быстрорежущая. Механические свойства. ГСССД 9–79. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 7 с.
7. Кенько, В. М. К вопросу учета структурных особенностей инструментальных сталей при изготовлении матриц холодновысадочной оснастки / В. М. Кенько, И. Н. Степанкин // Литье и металлургия. – 2004. – № 4. – С. 110–116.
8. Кенько, В. М. К вопросу оценки усталостной долговечности быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной посредством низкотемпературной нитроцементации / В. М. Кенько, И. Н. Степанкин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2003. – № 4. – Т. 2. – С. 11–14.
9. Хейфец, И. Л. Термомеханическая обработка холодновысадочного и резьбонакатного инструмента / И. Л. Хейфец // Кузнеч.-штамповоч. произ-во. – 1983. – № 11. – С. 37–38.