

**ЧАСТИНА III. МОДЕЛЮВАННЯ, ДИНАМІКА
ТА ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
В ДОСЛІДЖЕННЯХ НАДІЙНОСТІ**

УДК 679.18:536.7-531.3.07

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВОКРУГ
ВКЛЮЧЕНИЙ КАРБИДОВ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ
ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

Власовец В.М., д.т.н., проф., Заец В.Н., аспирант
*Харьковский национальный технический университет сельского
хозяйства имени Петра Василенко*

Выполнена оценка напряженно-деформированного состояния вокруг включений карбидов при охлаждении эвтектоидной стали по методу Ласло и с учетом фазовых превращений методом конечных элементов.

Вступление. Процесс разрушения рабочего слоя деталей сельскохозяйственной техники в процессе эксплуатации сводиться преимущественно к формированию и росту микротрещин до критического размера в результате воздействия знакопеременных нагрузок. Наличие карбидной фазы и неметаллических включений может как способствовать, так и препятствовать их развитию [1].

Роль включений в процессах пластической деформации, разрушения сказывается и на уровне механических свойств материала при его эксплуатации. Уровень свойств зависит от морфологии и ориентации включений в изделии (расположение вдоль или поперек проката, в теле зерен или преимущественно по его границам). Традиционные методы расчета напряженно-деформированного состояния вокруг включений, в частности по методу Ласло, не позволяют выполнить такую оценку. Кроме того, они не учитывают фазовые превращения и ползучесть микрообъемов материала при температурах выше $0,45T_{пл}$, происходящие при охлаждении материала, содержащими карбидные частицы. Поэтому важным представляется разработка новых методов оценки напряженно-деформированного состояния с учетом фазовых превращений и пластичности при повышенных температурах.

Цель. Выполнить оценку напряженно-деформированного состояния вокруг включений карбидов цементитного типа при охлаждении эвтектоидной стали с учетом фазовых превращений и ползучести методом конечных элементов.

Материал и методы исследований. Для моделирования напряженно-деформированного состояния при охлаждении материала решали не-

стационарную задачу термоупруговязкопластичности с учетом фазовых превращений методом конечных элементов [2]. Моделирование осуществляли на основе данных изотермических и термокинетических диаграмм распада аустенита. Учет выделения скрытой теплоты фазовых переходов осуществляли введением в уравнение теплопроводности мощности внутренних источников энерговыделения. Граничные условия и порядок выполнения расчетов приведен в работе [3].

Исследования микроструктуры проводили на катаных мелющих шарах из стали эвтектоидного состава М74 Ø80 мм, следующего состава, %: 0,74 С, 0,82 Мн, 0,11 Si, 0,19 Cr. Шары подвергались закалке от 850°С в воду до полного остывания (температура воды - 20°С) и отпуску при 120°С и 250°С. Использовали металлографический и микрорентгеноспектральный анализ.

Для получения изображений в светлом поле при прямом освещении использовали горизонтальный металлографический микроскоп МИМ-8М, а исследования состава неметаллических включений, их распределения осуществляли на растровом электронном микроскопе-микроанализаторе JSM-820 Link "JEOL" с системой рентгеновского микроанализа Link AN10/85S "Link Analytical". Статистический анализ количества и распределения неметаллических включений по специально разработанной методике [4]. Анализ позволил обосновать выбор 10 размерных групп включений, определить параметры трехмерной микроскопической структуры (объемную долю фазы, относительную удельную поверхность, число микрочастиц в единице объема). Относительная ошибка составила $\varepsilon = 8,2\%$.

Исследуемая структура рабочего слоя стали состоит из мартенсита, дисперсной карбидной фазы и неметаллических включений, расположенных в виде отдельных включений различной формы и по границам зерен.

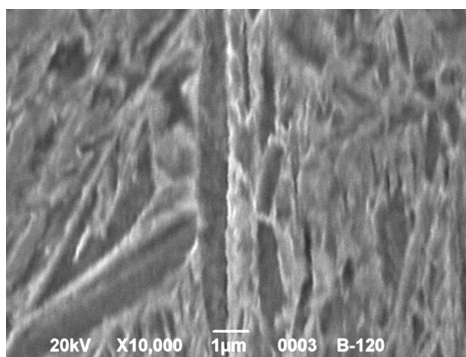


Рис. 1. Микроструктура мартенсита рабочего слоя исследованного изделия

На основании статистических исследований были выделены 10 размерных групп включений. Построены гистограммы зависимостей размера включений от их количества (рис.2). Анализом количества и распределения неметаллических включений подтверждено, что в размерных группах 1–5 (0,5–3,5 мкм) преобладают включения карбидной фазы (рис. 3). Область вокруг неметаллических включений состоит из зон упругой и пластической деформаций. Развитие упругой деформации определяется величиной зерна, наличием различных барьеров, например, других включений. Известно [5], что дисперсные карбидные включения способствуют формированию микронапряжений в зоне деформаций у микрочастиц, и могут существенно повышать уровень магнитной характеристики – H_c .

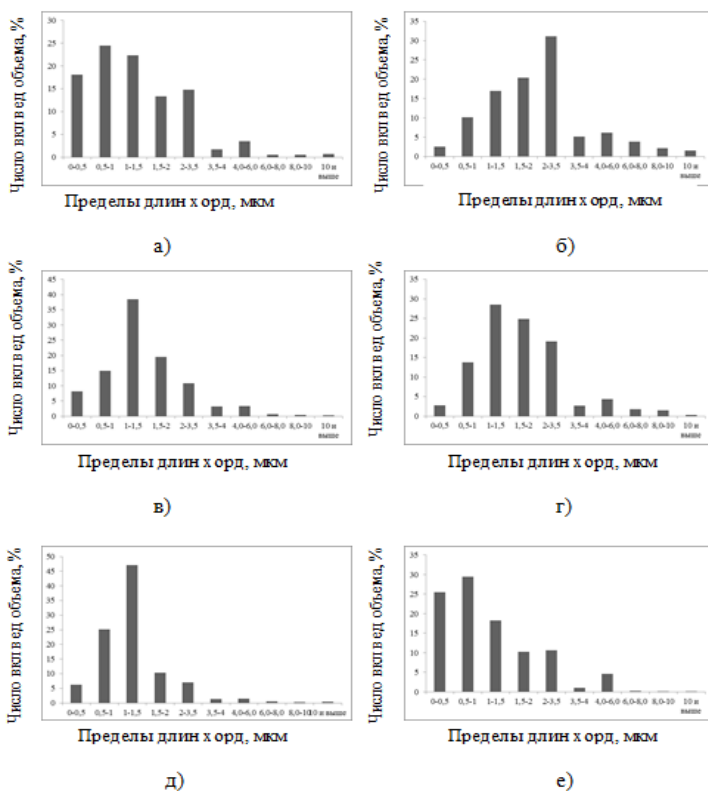


Рис.2. Гистограммы распределения числа микрочастиц в рабочем слое изделия из стали 75 в зависимости от температуры отпуска, сечения (вдоль и поперек проката): а, б – без отпуска, в, г – с отпуском 120 °С, д, е – с отпуском 250 °С, а, в, д – вдоль проката, б, г, е – поперек проката.

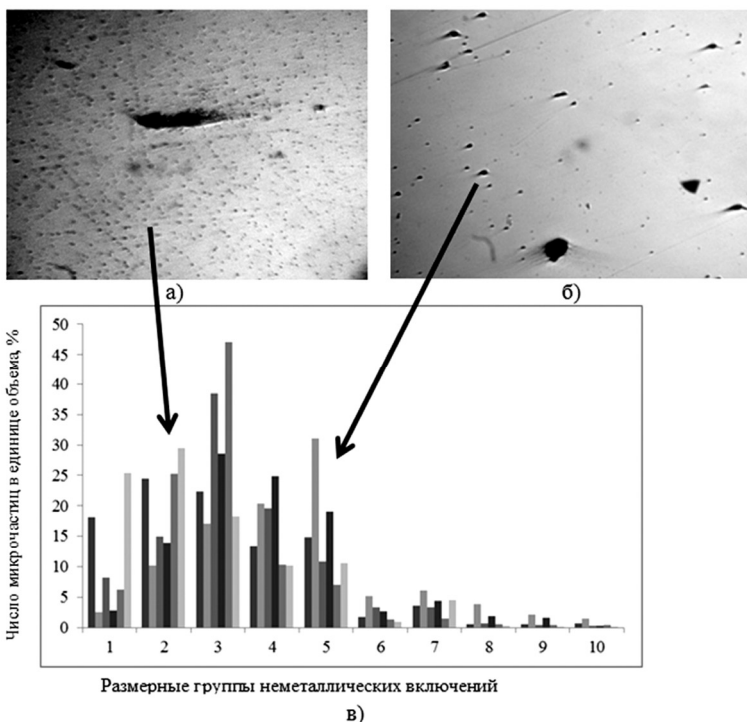


Рис.3. Гистограмма распределения числа микрочастиц в рабочем слое изделия из стали 75 в зависимости от температуры отпуска и сечения вдоль и поперек проката 1,2 столбец – без отпуска, 3,4 – с отпуском 120 °С, 5,6 – с отпуском 250°С, и структура с увеличением $\times 100$.

Выполнили расчет напряженно-деформированного состояния, создаваемыми такими включениями.

Напряжения от включений рассчитывали по традиционному методу Ласло, основанному на положениях теории упругости (для сферических включений) исходя из размеров включений, полученных ранее:

$$P = \frac{(\alpha - \alpha_1) \times \Delta t}{\frac{1/2(1 + \vartheta_1) + (1 - 2\vartheta_2)d^3}{E_2(1 - d^3)} + \frac{1 + 2\vartheta_2}{E_1}}, \quad (1)$$

где α – средний линейный коэффициент в температурном интервале, $1/^\circ\text{C}$, E – модуль Юнга, МПа, ν – число Пуассона, $d=R_1/R_2$, радиус включения, мкм, k радиусу деформации вокруг включения, мкм, Δt – изменения температуры, $^\circ\text{C}$.

Расчеты, выполненные по данной методике позволили установить, что уровень напряжений вокруг карбидного включения в мартенситной матрице уменьшается с ростом его размера в 2 раза (табл. 1).

Таблица 1. Максимальный уровень напряжений вокруг карбидной фазы, МПа

Метод расчета	Средний размер включений карбидной фазы, мкм				
	0,5	1	1,5	2	3
Ласло	1900	1650	1400	1200	910

В то же время если зона пластической деформации пропорциональна размеру включения (возможно для ферритной или аустенитной матриц), то напряжение остается постоянным числом (порядка 2000 МПа) и не зависит от его размера. Расчетный уровень напряжений по методике Ласло в 2000 МПа существенно превышает пределы прочности матричной фазы и должен приводить к формированию микротрещин в материале, что не подтверждается металлографическими исследованиями. Кроме того, данный метод не учитывает выделения скрытой теплоты при распаде пересыщенных твердых растворов, существенно чувствителен к диапазону исследуемых температур (с увеличением разницы температур возрастают напряжения даже в зоне выше $0,45T_{пл}$) и не учитывает влияние фазовых превращений при охлаждении металла. Не представляется возможным оценить и взаимное влияние включений, расположенных рядом.

Использование второго исследованного метода – конечных элементов, основой которого является дискретизация области, занимаемой телом на конечные элементы, лишено подобных недостатков. Для моделирования был выбран четырехузловой конечный элемент PLANE 13 (рис. 4), для каждого элемента которого были заданы векторы узловых перемещений с учётом упругой составляющей, температурно наведённой и деформации ползучести в заданных интервалах температур. Теплофизические свойства материала – модуль упругости, плотность, коэффициент линейного температурного расширения, коэффициент теплопроводности, удельную теплоёмкость, принимали температурнозависимыми функциями и представляли в виде табличных данных.

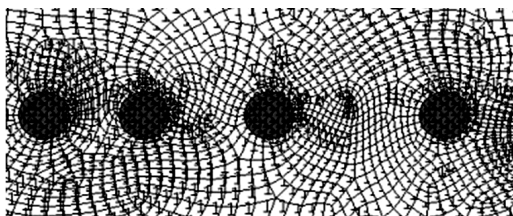


Рис.4. Конечно-элементная сетка модели карбидных включений

Результаты компьютерного моделирования представлены на рис.5.

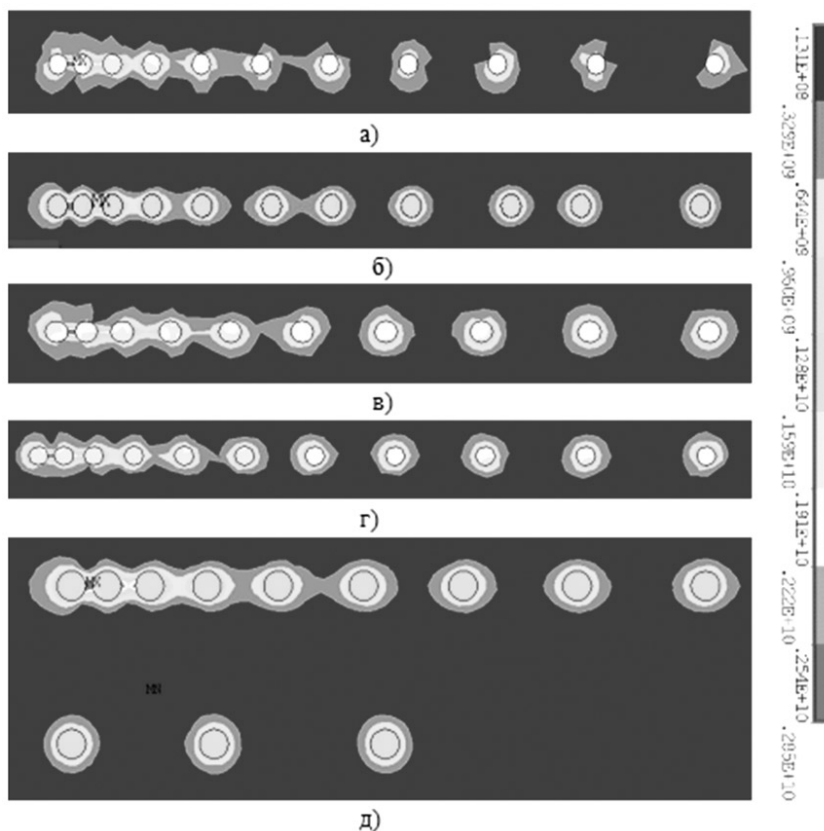


Рис.5. Напряжения по Мизесу вокруг включений различных диаметров (расстояние между включениями равно $0,25 d_{\text{вкл}}$, $0,5 d_{\text{вкл}}$, $1 d_{\text{вкл}}$, $1,5 d_{\text{вкл}}$, $2 d_{\text{вкл}}$, $3 d_{\text{вкл}}$, $4 d_{\text{вкл}}$, $5 d_{\text{вкл}}$), мкм: а – 0,5; б – 1; в – 1,5; г – 2; д – 3

Установлена зависимость протяжённости упрочнённой зоны от диаметра включений карбидной фазы (рис. 6), которая имеет вид:

$$h = 0,96 d_{\text{вкл}} - 0,32, \quad (2)$$

где h – протяжённость упрочнённой зоны, мкм;

$d_{\text{вкл}}$ – диаметр включения, мкм

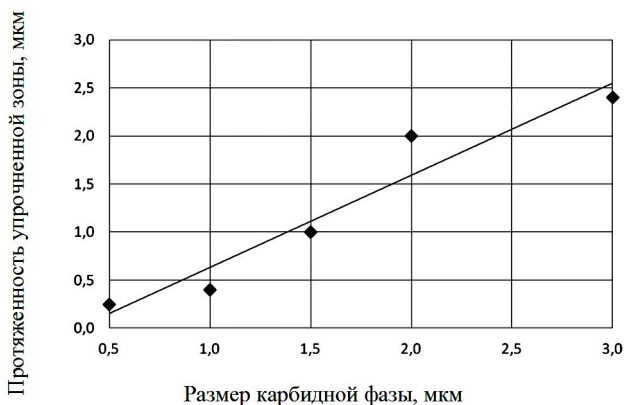


Рис.6. Протяжённость упрочнённой зоны от диаметра включений карбидной фазы по результатам моделирования

Критерий Фишера для данной модели составил 38,4 при уровне значимости 0,008. Модель адекватна, коэффициенты значимы (табл. 2).

Таблица 2. Значения коэффициентов в уравнении линейной регрессии

Модель	Нестандартизованные коэффициенты		Стандартизованные коэффициенты	t	Значимость коэфф.
	B	Стд. ошибка	β		
1 (Константа)	-0,323	0,281		-1,150	0,334
Диаметр включения	0,958	0,155	0,963	6,195	0,008

Примечание. Зависимая переменная – протяжённость зоны упрочнения (мкм), независимая – диаметр включения, мкм

Оценка влияния расстояния между включениями различных диаметров на уровень напряжённо-деформированного состояния позволила установить, что для рассмотренных групп такое взаимодействие характерно вплоть до 3-4 диаметров включений. Соответственно для карбидов размером 0,5-1 мкм максимальное расстояние между включениями, при котором заметно повышение уровня напряжений от их взаимного расположения составляет 3-4 мкм. Для большей размерной группы в 2-3 мкм такое влияние будет заметно на расстоянии 9–12 мкм. Установление такой связи важно для исследуемой стали, так как реализация дисперсного и

дисперсионного механизмов упрочнения связана не только с числом микрочастиц в единице объёма, но и с расстоянием между ними. В то же время слишком близкое расстояние между дисперсными частицами – менее $0,25-0,5 d_{\text{вкл}}$, способствует формированию высокого уровня напряжений (до 2850 МПа между близко расположенными включениями при среднем уровне в мартенсите 270–780 МПа), существенно превышающих ресурс пластичности металла. Это способствует повышенной дефектности таких микрообъемов и увеличению вероятности формирования микротрещин в условиях эксплуатации. Такое увеличение напряжений при достаточно большом количестве включений может быть зафиксировано и магнитным методом – по коэрцитивной силе.

Выводы. Выполненная оценка напряженно-деформированного состояния вокруг включений карбидов при охлаждении эвтектоидной стали по методу Ласло и с учётом фазовых превращений методом конечных элементов позволила установить не только ограничения традиционного метода, но и определить влияние расстояния между включениями различных диаметров на уровень исследуемого показателя. Впервые установлена зависимость, между протяжённостью упрочнённой зоны от диаметра включений карбидной фазы для стали эвтектоидного состава.

Список использованных источников

1. Скобло Т.С./ Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов./Т.С. Скобло, Н.М. Воронцов, С.М. Рудюк, Н.А. Будагьянц, В.А. Воронина. М.: «Металлургия», 1994г. – 336с.
2. Вафин Р.К. Прочность термообработанных прокатных валков. / Р.К. Вафин, А. М. Покровский, В. Г. Лешковцев – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 264с.
3. Власовец В.М., Заец В.Н./Моделирование процессов термической обработки катанных шаров из стали эвтектоидного состава//Новые материалы и технологии в машиностроении/ Под общей редакцией Е.А.Памфилова. Сборник научных трудов. Выпуск 20. – Брянск:БГИТА,2014. – 98с.
4. Вестник ХНТУСХ. Вып № 151 2014г. / Власовец В.М., Ефременко В. Г., Заец В. Н. / Разработка методики автоматизированного подсчета количества неметаллических включений в стали при оценке качества изделий. С. 266-274.
5. Сидашенко А. И., Власовец В.М., Заец В.Н./Оценка неметаллических включений в стали эвтектоидного состава/ Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Белорусского государственного аграрного технического университета и памяти первого ректора БИМСХ (БГАТУ), д.т.н., проф. В.П.Суслова:

«Современные проблемы освоения новой техник, технологий, организации технического сервиса в АПК » Минск, 4-6 июня 2014г в 2ч. – Минск: БГАТУ, 2014г. – С.361-368.

Аннотация

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НАВКОЛО ВКЛЮЧЕНЬ КАРБІДІВ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ЕВТЕКТОЇДНОЇ СТАЛИ В УМОВАХ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

Власовець В.М., Заєць В.М.

Виконано оцінку напружено-деформованого стану навколо включень карбідів при охолодженні евтектоїдної сталі за методом Ласло і з урахуванням фазових перетворень методом кінцевих елементів.

Abstract

SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATE AROUND THE INCLUSIONS OF CARBIDES DURING COOLING EUTECTOID STEEL IN A TRANSIENT HEAT CONDUCTION

Vlasovets V. M., Zaiets V. M.

The estimation of the stress-strain state around the inclusions of carbides during cooling eutectoid steel Laszlo method and taking into account phase transformations using finite element method