

© Д.И. Давыдов, Н.Н. Степанова, А.П. Ничипурук, М.Б. Ригмант,
Н.В. Казанцева, Н.И. Виноградова, 2012 г.
Институт физики металлов УрО РАН
г. Екатеринбург
davidov@imp.uran.ru

СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НИКЕЛЕВОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ*

Жаропрочные никелевые сплавы применяются для изготовления турбинных лопаток стационарных газотурбинных установок, длительно работающих в широких интервалах температур и напряжений. Основными фазами таких сплавов являются твердый раствор на основе никеля и упрочняющая фаза на основе интерметаллида Ni_3Al со сверхструктурой типа $L1_2$ (γ' -фаза). Кроме интерметаллидной γ' -фазы также присутствуют карбиды (MeC и Me_{23}C_6), которые выделяются на границах и внутри зерен в виде включений.

Магнитные методы неразрушающего контроля широко используются в промышленности для оценки работоспособности деталей, но никогда не применялись для изделий из жаропрочных никелевых сплавов. Интерметаллическое соединение $\text{Ni}_{75}\text{Al}_{25}$ является слабым ферромагнетиком с температурой Кюри $T_c = 41$ К. Все фазы сплава и при комнатной температуре, и в интервале рабочих температур находятся в парамагнитном состоянии. Жаропрочные сплавы имеют низкое значение магнитной восприимчивости (порядка 10^{-4}).

Материал турбинных лопаток после длительной эксплуатации по стандартному режиму (в течение десятков тысяч часов) остается в парамагнитном состоянии. Стандартный режим характеризуется тем, что рабочие лопатки никогда не эксплуатируются на верхнем пределе рабочего интервала температур сплава, из которого они изготовлены. Для лопаток из сплава ЧС-70ВИ (40 % γ' -фазы), имеющего верхний предел 900 °С, рабочей температурой, как правило, является 800 °С.

В настоящее время в энергетике активно предпринимаются попытки повышения мощности и к.п.д. газотурбинных установок. В частности, экспериментальная турбина ГТЭ-45-3 Якутской ГРЭС имеет мощность в четыре раза больше серийных турбин, что достигается повышением рабочей температуры с 800 °С до 880 °С и скорости вращения с 3000 до 5300 об./мин. При работе по такому режиму сплав ЧС-70ВИ оказывается в экстремальных условиях по температуре и уровню напряжений.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-02-12189.

Целью данной работы являлось изучение фазовой и структурной стабильности сплава ЧС-70ВИ в ходе эксплуатации; установление причин появления деформационно-индуцированного магнетизма в жаропрочном сплаве с упрочняющей фазой на основе интерметаллида Ni_3Al .

При исследовании лопатки, работавшей по экспериментальному режиму, установлено повышение магнитной восприимчивости χ ее материала. Измерения выполнены при комнатной температуре с помощью измерителя магнитной проницаемости ИМПАС-1.

Увеличение магнитной восприимчивости различно в различных частях детали, максимальные значения получены для спинки пера (его выпуклая часть). Перо лопатки подвергалось одновременному действию высокой температуры и напряжений (растягивающих и знакопеременных при вибрации). Известно, что напряжения максимальны в спинке пера. В замке лопатки, подвергавшемся в основном тепловому воздействию, значения магнитной восприимчивости не изменились по сравнению с исходным состоянием до эксплуатации. Результаты изменения магнитной восприимчивости на участке пера, включающем его спинку, приведены на рис. 1.

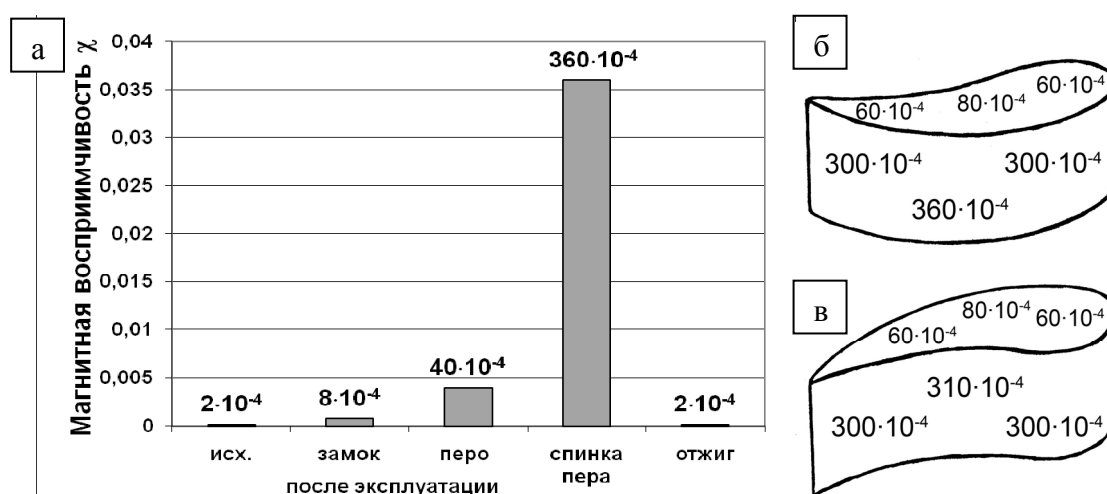


Рис. 1. Значения магнитной восприимчивости в различных участках лопатки из сплава ЧС-70В после ее длительной эксплуатации: а) общая диаграмма изменения магнитной восприимчивости; б) спинка лопатки (выпуклая часть пера); в) вогнутая часть пера

Изменение χ на два порядка можно интерпретировать, как «образование в сплаве при деформации порядка 1 % дисперсной ферромагнитной фазы». Однако общее представление о процессе деформации жаропрочного сплава не предполагает образования каких-либо новых магнитных фаз. Таким образом, остается открытым вопрос о том, что может быть структурным объектом, ответственным за появление ферромагнитных свойств у никелевого сплава.

Структура исследованной лопатки из сплава ЧС-70ВИ за время эксплуатации (9300 ч) по экспериментальному режиму подверглась ряду необратимых изменений. В замке лопатки под действием температуры происходит коагуляция частиц γ' -фазы, каких-либо дефектов внутри частиц не выявлено. В спинке лопатки (выпуклая часть пера), где напряжения максимальны, можно видеть как полосы скольжения (рис. 2а), так и сверхструктурные дефекты упаковки (СДУ) (рис 2б).

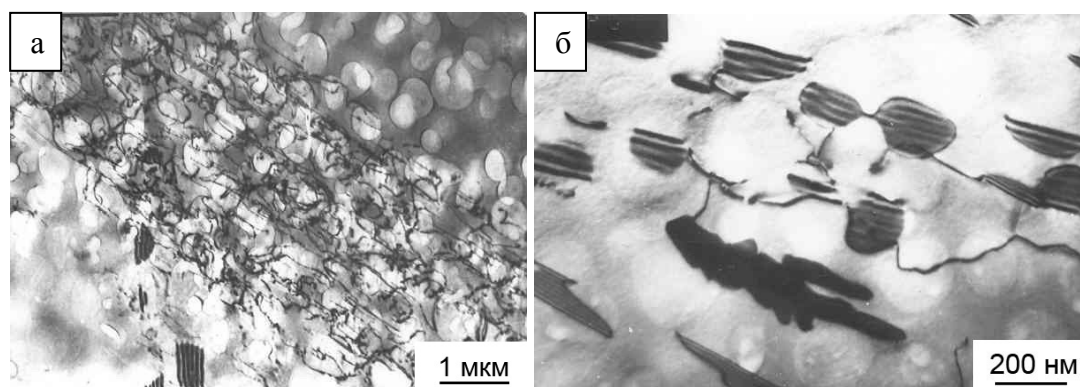


Рис. 2. Структура лопатки из сплава ЧС-70В после наработки 9390 ч при 880 °С: а) полосы скольжения в пере лопатки; б) дефекты упаковки в частицах упрочняющей интерметаллидной фазы, спинка пера

Появление ферромагнитных свойств в нашем случае связано с интерметаллидной фазой (Ni_3Al). При стандартном режиме эксплуатации деформация идет преимущественно в твердом растворе, и это не приводит к каким-либо ферромагнитным свойствам. Жаропрочные сплавы можно рассматривать как композиционный материал, состоящий из матрицы (γ твердый раствор) и упрочняющей γ' -фазы (Ni_3Al). Обе они принимают участие в деформации, но сопротивление деформации этих фаз различно. Преимущественно деформируется твердый раствор. В упорядоченном кристалле движение дислокаций сопровождается образованием высокоэнергетического дефекта: антифазной границы. Дислокации, если и заходят внутрь частиц интерметаллидной фазы, то сразу же покидают их. При этом не происходит образования каких-либо устойчивых комплексов дефектов внутри частиц γ' -фазы. Процесс не сопровождается появлением у сплава ферромагнитных свойств. При этом ответственное за возникновения ферромагнетизма обменное взаимодействие может возникнуть только в объеме, отдельная дислокация не может быть носителем магнетизма, также как и отдельный плоский дефект.

В исследованном нами сплаве выявляется большое количество планарных дефектов, как в твердом растворе, так и внутри частиц γ' -фазы (рис. 3). Дефекты в основном относятся к сверхструктурным дефектам упаковки вычитания. Концентрация дефектов максимальна в наиболее нагруженной части лопатки (спинка пера). Чем выше степень деформации, тем больше СДУ в сплаве, тем выше магнитный эффект. Все это дает

основание полагать, что именно в зонах СДУ формируются области, ответственные за появление ферромагнитных свойств.

В случае пересечения дефектов упаковки, лежащих в трех различных плоскостях, могут образовываться объемные тетраэдры дефектов упаковки. Эти дефектные образования появляются за счет сдвига и поворота атомных слоев и являются зонами нарушенного порядка с возможностью формирования в них кластеров с повышенной концентрацией атомов никеля. Расположение атомов никеля внутри такой области не является регулярным и не приводит к появлению самостоятельных отражений на дифракционной картине.

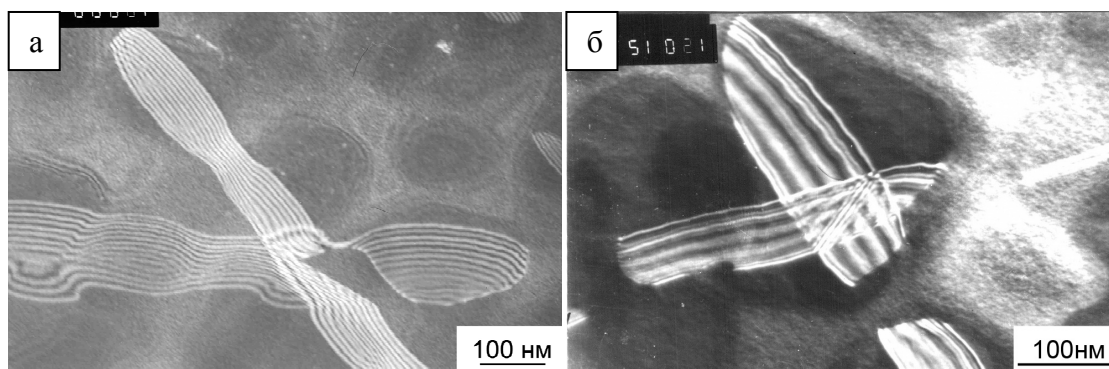


Рис. 3. Области взаимодействия между дефектами упаковки (СДУ) в γ' -фазе образца, вырезанного из спинки пера лопатки, темнопольные изображения

Отжиг устраняет дефекты внутри частиц интерметаллидной фазы. После отжига образцы, вырезанные из спинки пера, возвращаются в парамагнитное состояние.

Таким образом, длительная эксплуатация изделий из жаропрочных никелевых сплавов, в том числе из сплава ЧС-70В, по стандартному режиму, не связанному с образованием устойчивых комплексов дефектов внутри частиц упрочняющей интерметаллидной фазы, не приводит к появлению у парамагнитного сплава ферромагнитных свойств, а деформация идет преимущественно по твердому раствору. Повышение уровня напряжений и температуры при экспериментальном режиме ставит сплав на предел его возможностей, в этом случае по мере длительного высокотемпературного нагружения развивается деформация упрочняющей фазы. Образование устойчивых дефектов внутри γ' -фазы свидетельствует об ее разупрочнении. Интерметаллид приближается по своим механическим свойствам к твердому раствору и перестает выполнять функцию упрочняющей фазы.

Наблюдается корреляция между количеством структурных дефектов в различных частях турбинной лопатки и значением магнитной восприимчивости. Это открывает возможность применения методов магнитного неразрушающего контроля для оценки стабильности структурного состояния лопатки в процессе ее эксплуатации по экспериментальному режиму.