

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Лебедева Михаила Алексеевича «Исследование формирования остаточных напряжений и текстуры в гетерогенных поверхностных слоях и покрытиях», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Актуальность работы.

Остаточные напряжения играют важную роль в работоспособности ответственных изделий авиационной и энергетической отраслей, поэтому предпринимаются значительные усилия по разработке технологий создающих в поверхностных слоях сжимающие напряжения и повышения усталостной прочности в частности критических компонентов ГТД, что позволит увеличить допустимый размер дефекта и соответственно увеличить срок службы ГТД. Одним из последних достижений в этой области является технология лазерного удара, которая активно развивается всеми ведущими производителями авиационных двигателей и не только.

В этой связи возникает необходимость экспериментального определения остаточных напряжений, которое осуществляется с помощью дифракции рентгеновских лучей, а также механическими методами, включая наиболее популярные сейчас различные варианты контурного метода. Рентгеновский метод доминирует, поскольку является единственным неразрушающим методом оценки остаточных напряжений. Однако стандартный метод измерения остаточных напряжений, так называемый метод « $\sin^2\Psi$ » не пригоден для материалов обладающих градиентом периодов решетки по глубине. Это характерно, прежде всего, для материалов подвергнутых модифицированию поверхности с образованием твердых растворов внедрения, концентрация которых, а, следовательно, величина периода решетки снижется по мере удаления от поверхности, что приводит к неминуемым и непредсказуемым ошибкам « $\sin^2\Psi$ » метода. Кроме материалов с модифицированной поверхностью, практически все технологии получения массивных полуфабрикатов, включая сварку, термообработку, горячую деформацию также сопровождаются формированием в

поверхностных слоях градиента периодов решетки твердого раствора вследствие градиента элементов внедрения или замещения.

Наиболее выраженный характер имеет этот градиент в ТРИП сталях, в которых в результате мартенситного превращения в тонком поверхностном слое происходят резкие изменения химического и фазового состава. В результате до настоящего времени отсутствуют данные о формировании остаточных напряжений в этих сталях, в которых они играют определяющую роль, по крайней мере, по отношению к усталостным свойствам. Важную информацию о механизме процессов, протекающих при деформации и фазовых превращениях дают текстурные исследования. Кроме того, без учета текстуры α и γ -фаз невозможно оценить количественные изменения фазового состава в ТРИП сталях. Текстурные исследования также незаменимы для интерпретации механизма влияния энергетических параметров ионно-плазменного процесса на свойства нитридных покрытий.

В этой связи диссертационная работа Лебедева М.А., посвященная совершенствованию рентгеновских методов и установлению закономерностей формирования остаточных напряжений и текстуры в сталях с градиентной структурой поверхности для повышения надежности их применения в различных отраслях промышленности, несомненно является актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

Общая характеристика работы

В работе на основе анализа современных методов определения остаточных напряжений с использованием дифракции рентгеновских лучей, а также механических методов поставлена задача разработать методическую процедуру исследования закономерностей формирования структурно-фазового состояния и комплекса механических свойств в материалах с гетерогенной структурой поверхностных слоев, прежде всего ТРИП сталей. Для решения этой задачи оказалось необходимым использовать новый метод оценки остаточных напряжений, позволяющий в отличие от основного метода дифракционной тензометрии (« $\sin^2\psi$ ») получать адекватную информацию о напряженном состоянии в материалах с градиентом периодов решетки по глубине. Следует отметить, что ТРИП стали являются наиболее показательным примером в этом плане, поскольку они характеризуются таким выраженным градиентом химического и фазового состава поверхностных слоев, что для них до настоящего времени не определяли величину остаточных напряжений. Важно подчеркнуть, что диссертанту удалось уточнить механизм ТРИП эффекта с помощью комплексного использования количественных данных о фазовом составе, текстуре и

остаточных напряжениях. Интересные данные о механизме формирования структуры и свойств ионно-плазменных нитридных покрытий дали исследования влияния напряжения на подложке на текстуру покрытий.

Научная новизна

Наибольшую ценность с научной точки зрения представляют методические результаты работы. Несмотря на то, что методика измерения остаточных напряжений, основанная на использовании анизотропии упругих свойств объекта известна уже более 10 лет в рецензируемой диссертации впервые результаты применения этой методики использованы для решения задачи важной с научной и практической точек зрения – выявлению новых закономерностей ТРИП эффекта. Распределение остаточных напряжений в изделиях при термомеханических воздействиях обусловлено как термическими, так и структурными эффектами. Последние рассчитываются на основе оценки объемных эффектов превращения. Объемные эффекты превращения различаются для случаев полиморфных превращений, характерных для сталей и титановых сплавов и для случаев выделения интерметаллидных фаз, которые характерны для алюминиевых сплавов. Термический эффект в большинстве случаев дает растягивающие напряжения на поверхности изделия, поэтому важно контролировать объемный эффект структурных остаточных напряжений, который может при определенных условиях не только компенсировать растягивающие термические напряжения, но приводить к большим сжимающим напряжениям. Для того, чтобы обеспечивать такие условия необходимо осуществлять корректную оценку действующих напряжений. Именно это удалось достигнуть в диссертации и в этом ее главное достоинство.

Рентгеноструктурным методом исследовано соотношение γ - и α -фаз, их текстура и определены остаточные напряжения в тонколистовой аустенитно-мартенситной ТРИП-стали ВНС9-Ш. Показано, что в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в поверхностном слое стали происходит снижение с 85 до 47 %, количества аустенита, при этом распад аустенита осуществляется в основном за счет основного и поэтому наиболее наклепанного текстурного компонента (110) и сопровождается положительным объемным эффектом и формированием сжимающих напряжений -850 МПа в аустените и к полной релаксации высоких растягивающих напряжений в α -фазе.

Важным результатом представляется использование для количественной оценки стабильности аустенита в ТРИП сталях к мартенситному превращению под нагрузкой параметра Md_{30} (температура 50

% распада аустенита при 30 % деформации растяжением), который до сих пор не использовался для ТРИП сталей.

Безусловно, новыми являются обнаруженные в работе закономерности формирования текстуры в зависимости от энергетических условий нанесения ионно-плазменных нитридных покрытий. Анализ этих закономерностей позволил сформулировать критерий отбора текстурных компонентов в условиях неравновесного формирования покрытий, основанный на предпочтительности в этих условиях кристаллитов с ориентацией (111), которая является единственной атомной плоскостью, характеризующейся изотропией модуля Юнга в плоскости этого текстурного компонента.

Практическая значимость

Исследования методами количественного фазового и текстурного анализа влияния отпуска при 300-600°C на структурно-фазовые и ориентационные изменения в ТРИП-стали ВНС9-Ш позволили установить структурные критерии оптимизации механических свойств ТРИП сталей. Показано, что предел прочности на растяжение пропорционален количеству метастабильного аустенита в подповерхностных слоях. Так старение при 500°C обеспечивает в подповерхностных слоях 84% метастабильного аустенита, мартенситное превращение которого при нагружении приводит к максимальному пределу прочности в 1850 МПа. Снижение количества аустенита после отпуска при 600 °С до 55 % приводит к снижению предела прочности до 1570 МПа. Предел усталости коррелирует с уровнем сжимающих напряжений в поверхностном слое, который пропорционален количеству распавшегося аустенита, поэтому максимальные усталостные свойства имеют место в состоянии поставки и после отпуска при 300°C, когда на поверхности количество аустенита минимально (30-40%).

Обнаружена корреляция между напряжениями смещения, текстурой и микротвердостью ионно-плазменных нитридных покрытий. Показано, что высокие напряжения на подложке (-100В) приводят к формированию выраженной текстуры (111) в покрытиях, при этом их твердость вдвое ниже бестекстурных покрытий, сформированных при -10 В. Это связывают с тем фактом, что в нормальной плоскости (111) направлении величина модуля Юнга нитридных покрытий минимальна.

Достоверность полученных результатов

Подтверждается тем, что все основные научные выводы и рекомендации получены с использованием современных научных представлений о формировании остаточных напряжений, текстуры

деформации и фазовых превращениях, анизотропии упругих и механических свойств сталей и защитных покрытий. Обоснованность установленных в работе закономерностей не вызывает сомнения, поскольку автором тщательно и на современном методическом уровне проводится количественный анализ текстуры, фазового состава и остаточных напряжений, при этом для исследуемой ТРИП стали реализовано новое методическое решение, дающее более достоверные результаты по сравнению с существующими методическими решениями.

Замечания

1. Не ясно, почему для ионно-плазменных покрытий не исследовали влияние напряжений смещения на величину остаточных напряжений, которые являются, по крайней мере, не менее важными для этих покрытий, чем кристаллографическая текстура, тем более, что они могут оказывать влияние на ту же текстуру.
2. При формулировке механизма ТРИП эффекта диссертант заметное место уделяет текстурному фактору, однако для подтверждения этого желательно показать, как видоизменяется этот фактор для тех случаев, когда ТРИП эффект мало выражен или вообще отсутствует.
3. Одна и та же формула для определения количества аустенита из данных об интенсивностях рефлексов нескольких рефлексов α и γ фаз, учитывающая их текстуру, приведена трижды на стр.10, 62 и 65. Соотношение, безусловно, важное, но трехкратное его повторение кажется излишним.
4. Есть неточности в обозначениях достаточно известных терминов. Так, в сокращении ТРИП стали применительно к сталям пластифицированных превращением автором в основном используются прописные буквы, как это следует из англоязычной литературы, откуда взята данная аббревиатура (Transformation Induced Plasticity - TRIP), но начиная со стр.83 по не ясным причинам используются строчные буквы (трип-стали).

Сделанные замечания носят дискуссионный или уточняющий характер, не снижают научной и практической ценности и общей высокой оценки диссертационной работы.

Заключение.

В целом представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные

технические и технологические решения в области совершенствования методов определения остаточных напряжений и текстуры применительно к гетерогенным материалам, таким как ТРИП стали, сварные соединения и ионно-плазменные покрытия. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 6 научно-технических конференциях, опубликованы в 8 печатных работах, входящих в международную систему цитирования Scopus, в том числе 4 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в различных отраслях машиностроения. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Лебедев Михаил Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Баннх Игорь Олегович
Ведущий научный сотрудник
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
Кандидат технических наук

Подпись Баннх И.О. удостоверяю,
Учёный секретарь ИМЕТ РАН к.т.н.


Баннх Игорь Олегович
01.12.21

О.Н. Фомина

Адрес организации: 119334, Москва, Ленинский проспект, 49
Федеральное государственное учреждение науки Институт
металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
Электронный адрес: <http://www.imet.ac.ru/>
Телефон: +7 (499) 135-2060