

## Отзыв

на автореферат диссертации Колдаева Антона Викторовича  
*«Моделирование термодинамики и кинетики выделения избыточных фаз и прогнозирование их влияния на структуру и свойства низкоуглеродистых микролегированных сталей ферритного класса»,*

представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

В настоящее время высокопрочные низкоуглеродистые микролегированные стали широко применяются в машиностроении, строительстве, транспорте и других отраслях современной промышленности. Это обусловлено такими свойствами этих материалов, как высокая прочность, пластичность, вязкость, хладостойкость и коррозионная стойкость при хорошей свариваемости.

Для разработки нового поколения низкоуглеродистых микролегированных сталей с принципиально улучшенным комплексом свойств *актуальной задачей* является изучение и понимание основных закономерностей и условий формирования выделений избыточных фаз и их влияния на комплекс служебных свойств.

*Целью* представленной работы является создание физико-химических методов прогнозирования и установление закономерностей выделения избыточных фаз, а также научных основ разработки низкоуглеродистых Ti–Mo и Ti–Nb–V микролегированных сталей ферритного класса с высоким комплексом трудно сочетаемых прочностных (предел текучести более 700 МПа), пластических (относительное удлинения не менее 18–20%), других служебных свойств и технологии их производства.

*Научная новизна* исследования состоит в следующем.

Впервые разработана физико-химическая компьютерная модель зарождения и роста карбидных, нитридных, карбонитридных и других типов выделений избыточных фаз с учетом влияния деформации и состава стали, которая базируется на ряде представлений в рамках классической теории зарождения и роста зародыша новой фазы и широком использовании методов современной расчетной термодинамики.

Определены условия достижения высокой степени упрочнения, связанного с формированием в процессе  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения межфазных выделений на основе карбида титана в сталях, микролегированных титаном и молибденом.

Показано, что в микролегированных титаном, ниобием и ванадием сталях, подвергнутых ускоренному охлаждению после окончания горячей прокатки в аустенитной области, доминируют наноразмерные выделения (карбидов) карбонитридов, сформировавшиеся или зародившиеся в аустените. При этом твердый раствор остается пересыщенным относительно карбонитридных фаз и дополнительное образование наноразмерных выделений в феррите происходит при отжиге.

Установлено существенное отличие кинетики выделения карбонитрида ниобия из феррита при заданной температуре в зависимости от пути ее достижения. Показано, что при непосредственном охлаждении стали от температур полного растворения Nb(C, N) до 700 °С и выдержке при этой температуре в течение 30 мин происходит формирование единичных выделений, а после предварительного охлаждения до комнатной температуры происходит образование гораздо большего числа выделений.

Установлено, что в низкоуглеродистых Ti–Mo микролегированных высокопрочных сталях основным типом выделений, контролирующими механизмы зернограницного и дисперсионного упрочнения, является ГЦК-карбид на основе TiC. При температурах ниже 800 °С доля молибдена в нем возрастает, и для температур протекания  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения состав ГЦК-карбида близок к  $Ti_{0,43}Mo_{0,08}C_{0,49}$ .

Полученные в работе экспериментальные и теоретические результаты могут быть использованы как в учебном процессе (в частности, при чтении специальных курсов лекций по

