

**ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ МЕЖФАЗНЫХ $\gamma \rightarrow \alpha$ ГРАНИЦ
ПРИ ДИФФУЗИОННОМ ПРЕВРАЩЕНИИ АУСТЕНИТА**

Г. Д. Сухомлин, д. т. н.

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры»*

Внутрифазные и межфазные границы являются важными элементами микроструктуры большинства промышленных металлических материалов. Исследования последних лет показали, что границы зерен не бесструктурны, не аморфны (однородны), а построены из разнообразных кристаллоподобных атомных конфигураций, которые сообщают границам, а, следовательно, и поликристаллам, различные механические и физико-химические свойства [1–3]. В ряде работ показано, что от структуры границ зерен (ГЗ) существенно зависят многие свойства поликристаллических материалов, в частности, коррозионная стойкость, характер межкристаллитного разрушения, фазовые превращения [2–5]. Наибольшее признание в теории атомной структуры ГЗ получила концепция решёток совпадающих узлов (PCY), согласно которой граница имеет возможность снизить свою поверхностную энергию, если существует такой угол и ось, при повороте вокруг которой между исходной и повернутой решётками образуется подрешётка (более крупных размеров), узлы которой являются общими для двух исходных [1]. При этом отношение числа совпадающих узлов (атомов) внутри элементарной ячейки такой подрешётки в Σ раз меньше общего числа узлов в ней. Снижение энергии образующейся при этом «специальной» границы происходит, если её плоскость проходит вдоль наиболее плотноупакованных плоскостей PCY.

Реальная структура межфазных границ (МФГ) более сложная, так как полное совпадение узлов разных решёток невозможно, поэтому некоторые исследователи, изучая строение МФГ, допускают наличие некоторых релаксационных процессов, *предполагающих* образование подрешёток, состоящих из узлов, близких к совпадению [4], т. е., низкоэнергетических межфазных границ. Хови, Ааронсон и Хирт [5] предлагают разделить межфазные границы на когерентные, частично когерентные и полностью некогерентные, если они соответственно: а) не имеют дефектов; б) содержат минимальное количество «упорядоченных» дефектов и в) содержат максимальное количество неупорядоченных дефектов. При этом энергоёмкость таких границ возрастает с увеличением степени их дефектности. Смит в 1952 году предложил [6] оценивать относительную величину поверхностной энергии МФГ по схеме, показанной на рис. 1. Очевидно, что формула, определяющая соотношения энергий η , построена на предположении, что статистически энергии большинства МФГ в поликристалле будут примерно одинаковы. Однако, как показали многочисленные наблюдения, энергия МФГ в модели совпадающих узлов колеблется в значительных пределах в зависимости от величины и плотности совпадающих узлов в плоскости границы [1].

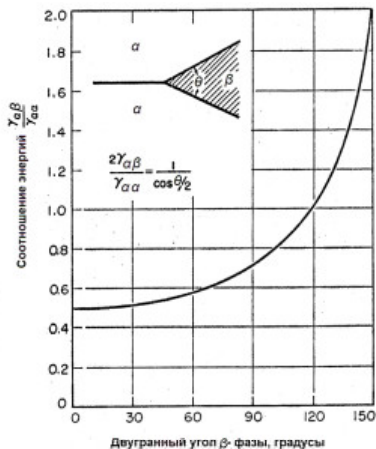


Рис. 1. Зависимость соотношения между энергиями межфазных и внутрифазных границ зёрен от двугранного угла θ [6].

ловых соотношений в равновесных тройных стыках межфазных и внутрифазных границ зёрен, взаимодействующих в процессе фазовой перекристаллизации в низкоуглеродистых сталях.

При полиморфных превращениях, осуществляющихся по диффузионному механизму, перемещение межфазной границы происходит путём беспорядочных перемещений атомов из одной, исходной фазы, в другую, дочернюю, без соблюдения каких-либо кристаллографических закономерностей [7]. Однако некоторые исследователи приводят данные, которые указывают на возможность образования доэвтектоидного феррита с реализацией ориентационной связи по Курдюмову–Заксу. Это может быть подтверждением ориентированного зарождения вторых фаз, возникающих по диффузионному механизму и образования специальных границ между дочерними кристаллитами.

В настоящей работе использовано свойство тройных стыков, определяющее соотношение удельной поверхностной энергии (натяжения) границ γ_i и величин противолежащих им углов α_i , которое описывается уравнением Янга:

$$\frac{\gamma_1}{\sin \alpha_1} = \frac{\gamma_2}{\sin \alpha_2} = \frac{\gamma_3}{\sin \alpha_3}. \quad (1)$$

С другой стороны, на шлифах низкоуглеродистых сталей с феррито-перлитной основой границы между ферритом и перлитом можно считать такими, которые возникают между доэвтектоидным ферритом и аустенитом. Действительно, до тех пор, пока аустенитный «островок» не распадётся с образованием группы колоний перлита, его периферийные границы являются межфазными – аустенитно-ферритными, а их натяжение зависит от атомной структуры границы между кристаллами двух фаз. Только после фазового пре-

На этом основании можно полагать, что и энергии разных границ $\gamma_{\alpha\beta}$ также будут различными. Поэтому формула, определяющая зависимость η от двугранного угла θ :

$$\frac{2\gamma_{\alpha\beta}}{\gamma_{\alpha\alpha}} = \frac{1}{\cos \theta/2},$$

и предполагающая одинаковые значения энергий всех границ $\alpha - \beta$, вызывает ряд вопросов. В частности, каковы энергетические спектры межфазных границ $\gamma-\alpha$ при распаде аустенита в эвтектоидных и доэвтектоидных сталях, ответ на который представляет значительный практический интерес.

Целью работы было определение величины удельной поверхностной энергии (натяжения) межфазных границ при диффузионном $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении путём измерения уг-

вращения границы аустенит-феррит превращаются в феррит-феррит (или, точнее, перлит-феррит). До этого момента миграция таких границ замедлена в связи с метастабильным равновесием, которое наступает при температурах, близких к A_{c1} передраспада аустенита. Так, на рисунке 2а показана область перлита, содержащая около 65 колоний перлита, а на рисунке 2б – соответствующая карта-схема, где стрелками указаны также некоторые стыки границ между колониями и ферритным зерном.

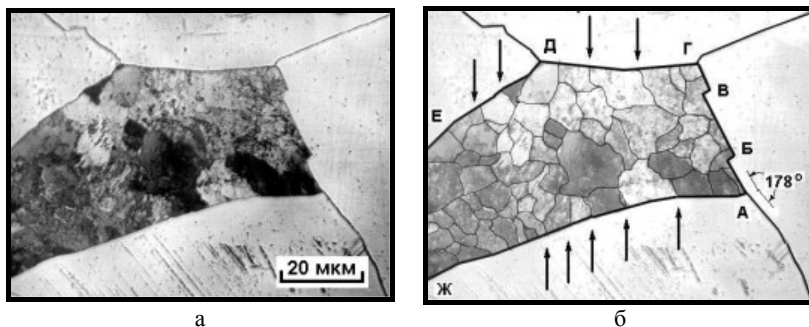


Рис. 2. Перлитная область в доэвтектоидной стали 06Х1 после отжига в течение 1 часа и охлаждения с печью: а – снимок на световом микроскопе с иммерсионным объективом; б – соответствующая карта-схема с контрастированием границ между колониями перлита.

Можно видеть, что границы между ферритными компонентами перлитных колоний не оказывают воздействия на границы с доэвтектоидным ферритом, что указывает на то, что они возникли уже после того, как сформировалась конфигурация тройных стыков между границами аустенит-доэвтектоидный феррит. Именно эти границы отражают взаимоотношения между силами поверхностного натяжения границ аустенит-феррит и феррит-феррит. Таким образом, области, содержащие перлитные колонии, можно условно считать аустенитными, а их границы с ферритом (например, Ж-А-Г-Д-Е) – межфазными границами $\gamma - \alpha$. На рисунке 2 отмечен тройной стык (точка А) и угол, противолежащий границе гамма-альфа А-Ж, который равен почти 180 градусам (более точно 178 градусов), что указывает на очень низкую поверхностную энергию межфазной границы.

Если принять величину средней удельной поверхностной энергии границ в феррите равной 780 эрг/см^2 , то по уравнению (1) межфазная граница на рис. 2 будет иметь энергию около 32 эрг/см^2 . Кроме того, граница $\gamma - \alpha$ на участке А-Г в окрестностях Б и В содержит фасетки, которые присущи низкоэнергетическим специальным границам по концепции РСУ.

Примеры статистической обработки изображений тройных стыков в ферритно-перлитных структурах сталей 20 и 06Х1 приведены на рисунке 3а, в и в таблице 1.

Гистограмма на рисунке 4 показывает бимодальное распределение углов в тройных стыках, связанное с низкоэнергетическими межфазными границами $\gamma - \alpha$, удельная поверхностная энергия которых составляет $\sim 30 \dots 70 \text{ эрг/см}^2$.

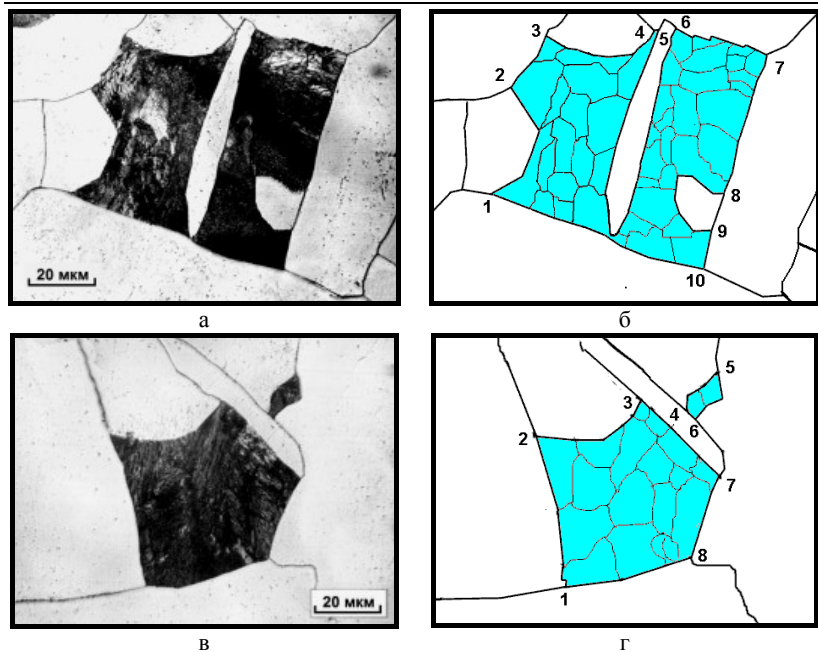


Рис. 3. Перлитные области (бывшие аустенитные) в доэвтектоидных сталях 20 (а, б) и 06X1 (в, г) после отжига в течение 1 часа и охлаждения с печью: а, в – снимки с иммерсионным объективом; б, г – соответствующие карты-схемы с контрастированием границ между колониями перлита.

Таблица 1

Углы между границами в тройных стыках границ структур сталей 20 и 06X1

№ стыка	Сталь 20 (рис. 3б)			Сталь 06X1 (рис. 3г)		
	θ_{aa}	θ_{ga}	θ_{ag}	θ_{aa}	θ_{ga}	θ_{ag}
1	50	157	173	91	96	173
2	88	101	171	55	126	179
3	92	92	176	87	95	178
4	112	120	132	85	97	178
5	75	115	170	72	113	175
6	96	95	169	80	92	178
7	105	115	140	85	101	174
8	82	121	177	110	112	138
9	86	109	175			
10	81	103	176			

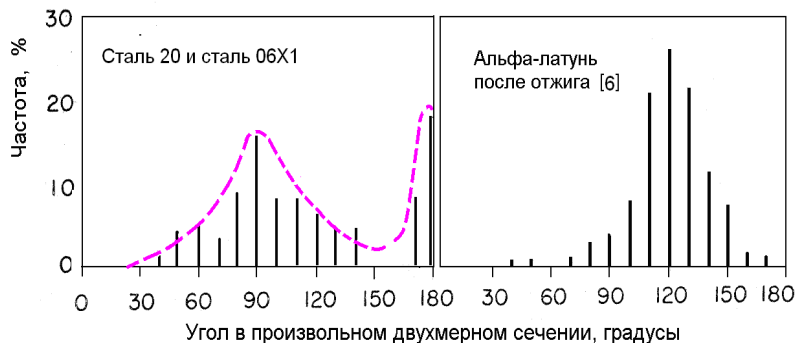


Рис. 4. Гистограммы распределения плоских углов между межфазными границами в тройных стыках зернограничных структур сталей 20 и 06Х1 и аналогичные результаты для α -латуни по данным работы [6].

Достоинством разработанной методики является простота и возможность исследования и анализа под световым микроскопом при комнатной температуре структур, образующихся при высокотемпературных превращениях.

Выводы

1. Предложена методика определения удельной поверхностной энергии межфазных границ аустенит-феррит в низкоуглеродистых сталях.
2. С использованием разработанной методики установлено, что энергия границ $\gamma - \alpha$, возникающих при диффузионном превращении аустенита, равна $\sim 30 \dots 70$ эрг/см², что составляет $\eta = 0,05 \dots 0,1$ от энергии границ феррит-феррит.

Список использованных источников

- 1 Косевич В.М., Иевлев В.М., Палатник Л.С., Федоренко А.И. Структура межкристаллитных и межфазных границ. М.: Металлургия, – 1980, – 256 с.
- 2 Watanabe T. The potential for grain boundary design in materials development. // Materials Forum. – 1988. Vol. 11 – P. 284-303.
- 3 Liml L.C., Watanabe T. Fracture toughness and brittle-ductile transition controlled by grain boundary character distribution (GBCD) in polycrystals. // Acta Metallurgica et Materialia – 1990, Vol. 38. – P. 2507-2516.
- 4 Евтеев А.В., Иевлев В.М., Косилов А.Т., Прижимов А.С. Релаксированная атомная структура межфазной границы в гетеросистеме полусферическая наночастица-кристалл. // ФТТ – 2007, Т. 49, вып. 4, – С. 745-650.
- 5 Howe J.M., Aaronson H.I., Hirth J.P. Aspects of interphase boundary structure in diffusional phase transformations. // Acta mat. -2000. Vol. 48. – P. 3977-3984.
- 6 Smith C.S. Microstructure // Trans AIME, – 1948, – Vol. 175, – P. 15-21.
- 7 Курдюмов Г.В., Утевский Л.М, Энтин Р.И. Превращения в железе и сталях. М.: Наука, – 1977, – 238 с.