

---

УДК 669.14.018.298'781

**ТРАНСФОРМАЦИЯ ГРАНИЦ ВКЛЮЧЕНИЕ-МАТРИЦА ПРИ  
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

**С.И.ГУБЕНКО, М.В.ИСЬКОВ**

*Национальная металлургическая академия Украины*

Проскальзывание вдоль границ включение-матрица сопровождается достаточно интенсивным диффузионным взаимодействием между включениями и стальной матрицей, поскольку дислокации, движущиеся как в самой границе, так и в прилегающих областях матрицы и пластичных включений, облегчают продольную и поперечную диффузию элементов, входящих в состав контактирующих фаз относительно границы их раздела. Кроме того, атомы, входящие в состав включения или матрицы и покинувшие свои кристаллические решетки, уже как электронные дефекты, становятся объектами внутренне электростимулированного взаимодействия как с дислокациями (межфазными дислокациями в границе включение-матрица, а также внутризерненными дислокациями в пластичном включении либо матрице), так и между собой. В результате возникают зоны насыщения матрицы элементами включения, а также зоны насыщения поверхностных слоев включения элементами стальной матрицы, причем в этих зонах образуются частицы новых нанофаз, состав которых зависит от химического состава исходной материнской фазы (включения или матрицы) и контактирующей фазы (соответственно матрицы или включения), а также от температуры и времени проскальзывания.

Состав частиц анализировали с помощью петрографии и ОЖЭ-спектрометра JAMP-10 (табл. 1). Анализ результатов показал, что при повышении температуры деформации изменяется химический состав частиц. Чем выше температура и меньше время проскальзывания, тем больше размеры частиц в зонах насыщения матрицы или включения, прилегающих к деформирующейся межфазной границе. Очевидно, проявляется влияние проскальзывания на диспергирование частиц, кристаллизующихся в неравновесных условиях.

Новые нанофазы возникают не только в зонах диффузионного взаимодействия пластичных включений и матрицы, но и непосредственно вдоль межфазной границы включение-матрица. Образование граничных фаз в процессе проскальзывания свидетельствует об активации процессов взаимодействия атомов, входящих в состав включения и матрицы в условиях интенсивного движения межфазных линейных и точечных дефектов, в также возникновения новых электрохимических связей между атомами. Реакции между компонентами включения и матрицы имеют место при проскальзывании, возможно при стремлении достижения на границе включение-матрица более равновесного состояния. Следует отметить, что диффузия каждого элемента (например, марганца) во включении и матрице описывается уравнением Фика со своим коэффициентом диффузии, отличающимся в этих контактирующих

фазах, поэтому возможен отсос этого элемента с межфазной границы в сторону включения либо матрицы и на межфазной границе возникает слой с новым химическим составом и структурой, а также иным уровнем пластичности, чем исходная граница включение-матрица.

Таблица 1.

Химический состав дисперсных частиц в зоне насыщения матрицы или пластичного включения элементами контактирующей фазы при разных температурах и времени проскальзывания

Исходное включение, марка стали	t <sub>деф.</sub> , °C	время проскальзывания, с	содержание элементов, об. %			Состав и размеры фазы, мкм
			Mn	Fe	Si	
(Fe,Mn)S 60Г	1000	60	34,5	21,5	- -	(Mn,Fe)O 2,5
		120	44,0			1,6
	1100	60	36,1	17,4	- -	3,5
		120	46,5			1,8
MnO.SiO <sub>2</sub> 60Г	1000	60	-	16,2	36,8 -	FeO.SiO <sub>2</sub> 2,6
		120	47,0			1,5
	1100	60	-	24,4	32,1 -	3,7
		120	43,5			2,1
Матрица 60Г	1000	60	-	26,6	34,2 -	FeO.SiO <sub>2</sub> 2,4
		120	39,2			2,0
	1100	60	-	28,7	32,5 -	3,8
		120	38,8			2,5
Матрица 08Ю	1000	60	24,5	- -	37,6	MnO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1,9
		120	37,9			1,5
	1100	60	31,1	- -	32,4	4,5
		120	36,5			2,4

Исследовали химический состав граничных фаз, возникших на границах пластичное включение-матрица в процессе проскальзывания (табл.2). Очевидно, что образующиеся фазы по формуле близки к равновесным фазам неметаллических включений и интерметаллидов, хотя их состав отличается от стехиометрического, поскольку формировались они в неравновесных условиях проскальзывания вдоль границы включение-матрица.

Характер концентрационной кривой на границе включение-матрица при проскальзывании зависит от конкретной диффузионной ситуации. При проскальзывании наблюдали как резкое изменение содержания компонентов на границе, так и участки насыщения прилегающей зоны матрицы или (и) включения с плавным изменением концентрации элементов, в которых при образовании дисперсных частиц новых фаз проявлялись локальные пики концентрации компонентов. Если же в процессе проскальзывания была сформирована граничная фаза, появлялись резкие пики или спады концентрации компонентов. Процесс образования граничных фаз, а также дисперсных частиц в зонах насыщения, прилегающих к границе раздела участках включения и матрицы при проскальзывании контролируется различием коэффициентов диффузии элементов во включении и матрице, следовательно, межфазная композиция зависит от химических реакций между этими элементами и можно предсказать граничный фазовый продукт. Это должны быть оксиды, карбиды, интерметаллиды, что подтверждается результатами, приведенными в табл. 1 и 2.

Таблица 2.

Содержание элементов в граничной фазе после проскальзывания

Исходное включение, марка стали	Содержание элементов, об.%								Граничная фаза
	Al	Mn	Fe	Si	Cr	C	S	O	
(Fe,Mn)S 60Г	-	34,6	25,9	-	-	-	-	39,5	(Fe,Mn)O; (Fe,Mn)C; <b>FeS</b>
	-	30,2	53,1	-	-	16,7	-	-	
	-	-	79,6	-	-	-	20,4	-	
MnO·SiO <sub>2</sub> 08Ю	25,9	74,1	-	-	-	-	-	-	Mn <sub>3</sub> Al
(Fe,Mn)S 08X18H10T	-	26,4	-	-	38,1	-	-	35,5	MnOCr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
FeO·SiO <sub>2</sub> 08X18H10T	-	19,6	-	31,2	27,3	-	-	21,9	(Cr,Mn)O· SiO <sub>2</sub>

Исследование процесса проскальзывания позволило представить основные закономерности трансформации границ включение-матрица при горячей деформации стали. Если в исходном состоянии межфазная граница представляет собой тонкую прослойку между включением и матрицей, то с развитием проскальзывания ее ширина увеличивается, а в процесс вовлекаются прилегающие зоны матрицы, если включение недеформируемое либо пластичное, а также включения, если оно пластичное. Это способствует уширению межфаз-

ных зон пластической деформации (релаксации) в системе включение-матрица.

В самой границе в результате перестроек движущихся дислокаций происходит динамическое фасетирование, если образуются фасетки-ступеньки с разными векторами жесткой трансляции, которое способствует образованию границ типа вицинальных и сдвиговому сопряжению решеток включения и матрицы. Если в границе в процессе проскальзывания формируются дислокационные конфигурации, способствующие образованию слоев с меньшей энергией, происходит динамическое расщепление границы на межфазную границу с меньшей энергией и зеренную границу.

В процессе проскальзывания возможно динамическое насыщение зоны матрицы элементами включения и образование здесь «спутельных» микроили наночастиц. Эти процессы несомненно связаны с электронным взаимодействием донор (включение)-акцептор(матрица), стимулирующим диффузионное взаимодействие контактирующих фаз через межфазные границы. Сложные диффузионные процессы могут привести к образованию сегрегаций и фракционированию примесей в границе включение-матрица, а также формированию граничной фазы. Степень дисперсности новых фаз зависит от уровня развития проскальзывания.

При плавлении легкоплавких включений проскальзывание вдоль границ пора-матрица приводит к фасетированию жидко-твердой границы включение-матрица, ее уширению и образованию зоны пластической деформации со стороны матрицы. При этом также возможны процессы диффузионного обмена между жидким деформирующимся включением и матрицей с образованием зоны насыщения в матрице, а также сегрегации примесей или граничной фазы.

Выводы. Проведенные исследования свидетельствуют о гетерогенизации процесса пластической деформации в системе включение-матрица в связи с вовлечением в процесс деформации самих границ и прилегающих к ним участков включения и матрицы, что обусловлено сложным динамическим контактным взаимодействием этих фаз (включения и матрицы). Несомненно, главным механизмом релаксации напряжений при проскальзывании в границах включение-матрица является пластический или сдвиговый механизм, который сопровождается сложными процессами на разных уровнях иерархии масштабов структуры межфазной границы. На атомном уровне происходит электронный обмен в системе включение (донор)-матрица (акцептор), а также сдвиговое сопряжение решеток включения и матрицы. На мезоскопическом уровне можно говорить о движении межфазных дислокаций, поглощении и делокализации в границах включение-матрица решеточных дислокаций, а также зарядовом взаимодействии межфазных дефектов. Фрагментарный уровень предопределяет развитие динамических фасетирования и расщепления границ включение-матрица, связанных с перераспределением межфазных

---

дефектов, а также образование примесных сегрегаций. Наконец, на микроскопическом уровне происходит уширение границ включение-матрица, вовлечение в процесс контактной деформации приграничных зон включения и матрицы, а также образование граничных фаз.