

Академик Н. В. АГЕЕВ, Л. А. ПЕТРОВА, Л. П. ГРАНКОВА, А. М. МАРКОВ

## О КОМПОЗИТНОМ МАТЕРИАЛЕ НА ТИТАНОВОЙ ОСНОВЕ

Для получения композитного (слоистого) материала на титановой основе использовали метод горячей прокатки в вакууме. Обработка температурно-силовых параметров технологии соединения и выяснение возможности создания прочного соединения между слоями проводили на пяти- и трехслойных титановых композитах.

В качестве пластической составляющей для пятислойного композита использовали фольгу технически чистого  $\alpha$ -титана ВТ1 толщиной 0,1 мм, из которой набирали лист с заданной конечной толщиной. Предполагалось, что лист, набранный из  $n$  слоев, будет иметь большее сопротивление хрупкому разрушению, чем монолитный лист той же толщины. Перед прокаткой листы фольги протравливали в разбавленной плавиковой кислоте и промывали в теплой воде с добавлением перекиси водорода. Во избежание провисания фольги, введенной в зону нагрева вакуумного прокатного стана при ее соединении в многослойный пакет, фольге придавали жесткость путем выдавливания на ней под прессом ребер жесткости. После этого пакет из девяти слоев фольги прокатывали при температуре 1150°С с обжатием ~30% до толщины 0,6 мм. Время нагрева составляло ~10 сек. Затем две пластины фольги толщиной по 0,6 мм соединяли при тех же условиях в пластину толщиной ~1 мм и использовали ее в композите.

Высокопрочным материалом для композита служил сплав ИВТ1 (Ti-7Mo-5,5Cr-3Fe-3Al), имеющий после закалки структуру  $\beta$ -твердого раствора, а после старения —  $\alpha + \beta$ ; выделение мелкодисперсной  $\alpha$ -фазы при старении позволяет получать на сплаве  $\sigma_b \sim 150-170$  кг/мм<sup>2</sup>. Листы сплава ИВТ1 толщиной 0,65 мм получали раскаткой при комнатной температуре пластин толщиной 2 мм, отожженных в вакууме при 10<sup>-5</sup> мм рт. ст., при температуре 900° в течение 1 часа. Чередующиеся пластины сплава ИВТ1 (3 слоя — по краям образца и в центре) и титановой фольги (2 слоя) перед соединением прокаткой сваривали по периметру и прокатывали при температуре 1100° с обжатием 35%. Время нагрева образца составляло 2 мин. Полученная пластина имела размеры  $b \times l \times h = 45 \times 100 \times 2,7$  мм. При плавке прокаткой при комнатной температуре толщина образца уменьшилась до ~2,3 мм. Полученный пятислойный композит разрезали вдоль прокатки на заготовки под образцы и термообработывали по режиму: закалка в воде после отжига при 800° в течение 40 мин. и старение при 550° в течение 15 час. с последующим охлаждением на воздухе. Режим термообработки является оптимальным режимом для получения высокой прочности на сплаве ИВТ1.

На образцах после прокатки, после закалки и старения изучали структуру, микротвердость слоев и диффузионное перераспределение легирующих элементов между слоями. Металлографическое исследование поперечного сечения композита выявило неравномерность течения пластической деформации слоев при соединении их прокаткой описанным выше способом (рис. 1). В то же время наблюдаемая картина позволяет судить о наличии прочной связи на границе раздела слоев композита.

Аналогичную картину неравномерного течения пластической деформации при получении композита прокаткой, названную эффектом многократного шейкообразования, наблюдали авторы работы (1). Неравномерность

пластической деформации составляющих слоев при прокатке пятислойного композита проявлялась не только разной толщиной составляющих слоев, но и различной степенью раздробленности зерен в слоях и разной степенью их рекристаллизации. Толщина центрального слоя сплава ИВТ1 изменялась по длине образца от 0,1 до 0,4 мм, слоя  $\alpha$ -титана — от 0,35 до 0,6 мм (рис. 1). Границы раздела слоев фольги, из которых набраны пластические составляющие композита, как правило, неразличимы, хотя в некоторых сечениях  $\alpha$ -слоя по длине образца обнаружены нарушения сплошности в соединении листов фольги между собой.

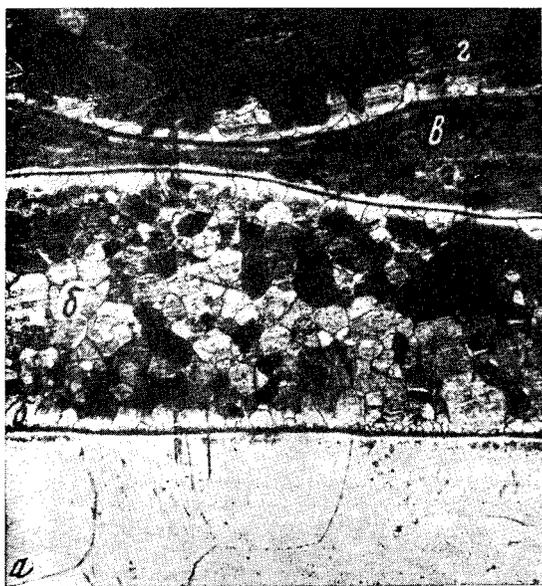


Рис. 1. Участок поперечного сечения пятислойного композита после термообработки; а, в — сплав ИВТ1; б, г —  $\alpha$ -слой; 70 $\times$

резкому скачку в изменении концентрации легирующих элементов (Mo, Cr, Fe, Al), при переходе из  $\beta$ - в  $\alpha$ -слой, что хорошо видно на кривых распределения молибдена ( $\beta$ -стабилизирующий элемент) и алюминия ( $\alpha$ -стабилизирующий элемент), приведенных на рис. 2а, в качестве примера, можно судить при существующей точности прибора об отсутствии диффузионного перераспределения элементов в момент прокатки. Иная картина распределения легирующих элементов в слоях наблюдалась после термообработки. Концентрация молибдена и алюминия в  $\beta$ -слое заметно снижалась (рис. 2б, г), а титана — повышалась на границе раздела с  $\alpha$ -слоем, что свидетельствовало об активно идущем процессе взаимной диффузии элементов при температурах термообработки композита.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными измерениями микротвердости. Микротвердость  $\alpha$ - и  $\beta$ -слоев на границе раздела в образцах в исходном состоянии была одного порядка с микротвердостью всего  $\alpha$ - или  $\beta$ -слоя. В термообработанных образцах микротвердость  $\alpha$ -слоя на границе раздела с  $\beta$ -слоем выше, чем в его средней части; кроме того, увеличился разброс в значении микротвердости. Оба явления можно связать с перераспределением легирующих элементов вблизи границы раздела слоев из-за активно начавшегося процесса взаимной диффузии. Однако необходимо отметить, что уже в исходном состоянии наблюдалось как очень высокое значение микротвердости  $\alpha$ - и  $\beta$ -слоев, так и большой разброс этих значений: для  $\beta$ -слоя от 400 до 470 кг/мм<sup>2</sup> и для  $\alpha$ -титана от 270 до 330 кг/мм<sup>2</sup>. Большое колебание значений микротвердости подтверждает вывод о неравномерности пластической деформации слоев при соединении их прокаткой описанным выше способом. Столь высокое значение микротвердости можно объяснить тем, что металл был подвергнут значительной пластической деформации при соединении, что особенно хорошо заметно по степени дробления зерен  $\alpha$ -титана при сравнении

структуры композита со структурой исходного материала (рис. 3а, б). Микротвердость  $\alpha$ -слоя закаленных образцов составляла 350 кг/мм<sup>2</sup>, а после старения 250–300 кг/мм<sup>2</sup> (рис. 3в, г); при этом микроструктура  $\alpha$ -слоя в обоих случаях не соответствовала структуре однофазного твердого раствора.

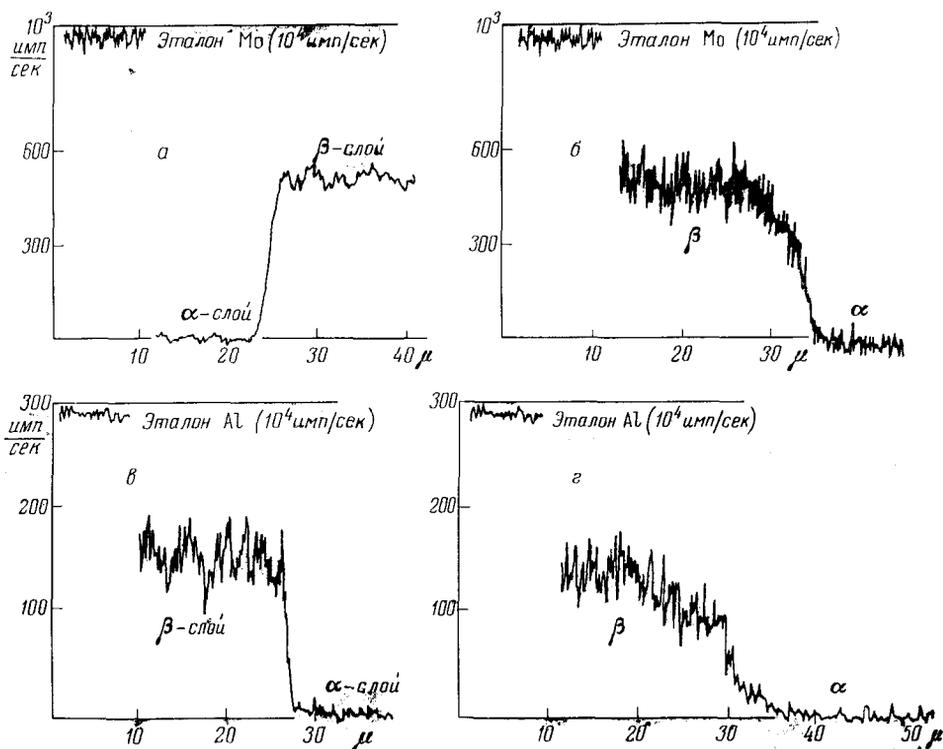


Рис. 2. Кривые распределения молибдена и алюминия на границе раздела слоев композитного материала. а, б — непосредственно после прокатки; в, г — после термообработки. Интенсивность эталона снята на шкале  $10^4$ , интенсивность образца — на шкале  $10^3$

С помощью рентгеновского фазового анализа  $\alpha$ -слоя (на дифрактометре Дрон-1 и  $\text{CuK}\alpha$ -излучении) выделения на поверхности  $\alpha$ -титана были идентифицированы как гидрид титана  $\text{TiH}_2$ . Следы гидрида титана были обнаружены и в исходной фольге. Увеличение гидрида титана в композите связано, по-видимому, с процессом обработки поверхности листов фольги будущего слоистого материала (перед соединением их прокаткой) в плавиковой кислоте. Такую обработку следует считать нежелательной без последующего динамического вакуумного отжига. Наличие гидрида титана, очевидно, способствует высокому значению микротвердости  $\alpha$ -слоя; в случае закаленного состояния еще более высокое значение микротвердости, возможно, связано с наличием мартенситной  $\alpha'$ -фазы, которая присутствует помимо  $\alpha$ -фазы (рис. 3в).

В качестве пластичной составляющей для трехслойного композита использовали  $\alpha$ -сплав титана (крайние слои), а в качестве высокопрочной составляющей — сплав, близкий по свойствам к сплаву ИВТ1 (середина). Полученный трехслойный композит разрезали вдоль прокатки на заготовки под образцы для испытания механических свойств на растяжение. Термообработку проводили аналогично ранее описанным условиям.

Прочность трехслойного композита соответствовала прочности, рассчитанной по принципу аддитивности (<sup>2</sup>), при общем отношении пластической составляющей к прочной 2 : 1.

Исследование микроструктуры образцов трехслойного композита после

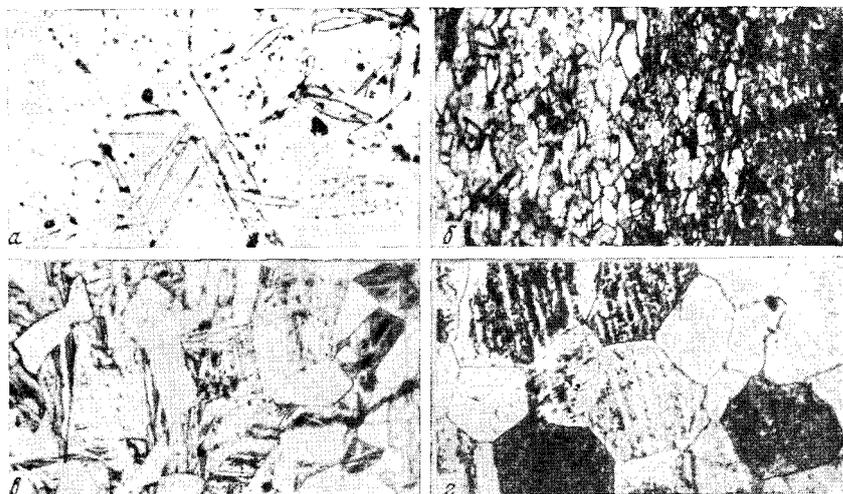


Рис. 3. Микроструктура исходной фольги (а) и  $\alpha$ -слоя (б—г) композитного материала после прокатки (б),  $H = 270\text{--}300$  кг/мм<sup>2</sup>, закалки (в),  $H = 350$  кг/мм<sup>2</sup>, и после закалки старения (г),  $H = 250\text{--}300$  кг/мм<sup>2</sup>. 420 $\times$

испытания на растяжение показало, что разрушение идет довольно равномерно по телу всего образца. Кроме того, изучение микроструктуры соединений слоев выявило, что ширина переходного слоя изменялась от образца к образцу от 4 до 11  $\mu$ . При этом переходная зона имела микротвердость выше, чем соседние слои: 497 против 450 кг/мм<sup>2</sup> для прочной составляющей и 320 кг/мм<sup>2</sup> для пластичной составляющей. Столь высокое значение микротвердости переходной зоны связано, как показал рентгеноспектральный анализ распределения  $\alpha$ - и  $\beta$ -легирующих элементов по поперечному сечению трехслойного материала, с высокой насыщенностью границы раздела слоев легирующими элементами, обусловленной двухсторонней диффузией между пластичной и прочной составляющими. Твердость  $\alpha$ -сплава, примыкающего к переходной зоне, выше, чем в середине  $\alpha$ -слоя и на краю образца. Это также объясняется насыщенностью приграничной области  $\alpha$ -сплава легирующими элементами.

Для выяснения влияния количества слоев (многослойности), составленных из одного и того же материала и разных материалов, на механические свойства были изготовлены образцы из сплава ИВТ1, состоящие из различного набора слоев и одного слоя одинаковой толщины (монокристалл) и образцы из сплава ИВТ1 и  $\alpha$ -титана. Монокристалльный образец сплава ИВТ1 1,5 мм после различных термообработок показал прочность, равную 78,6 и 101,4 кг/мм<sup>2</sup>; при прочих равных условиях на образцах той же толщины (1,5 мм), но состоящих из восьми слоев, получена  $\sigma_b$  соответственно 85 и 117,3 кг/мм<sup>2</sup>. На пятислойном композитном материале общей толщиной 1,5 мм ( $\alpha$ -титан и сплав ИВТ1) после закалки в воде после отжига при 800° в течение 15 мин. получена  $\sigma_b = 73,6$  кг/мм<sup>2</sup>, а на 128-слойном образце той же толщины и при тех же условиях  $\sigma_b$  составила 91,3 кг/мм<sup>2</sup>.

Полученные результаты показывают, что образцы, состоящие из  $n$  слоев одного и того же материала, обладают большей прочностью, нежели монокристалл. Более высокую прочность удается реализовать с увеличением количества слоев и в композитном материале.

Институт металлургии им. А. А. Байкова  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
19 X 1972

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. С. Иванова, Ч. В. Копецкий и др., ДАН, 196, № 6, 1324 (1971).  
<sup>2</sup> A. Kelly, G. Davies, Metallurg. Rev., 10, № 37, 1 (1965).