

УДК 621.791

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-6-301-15-23

*В. П. Кулевич, В. Г. Шморгун, А. И. Богданов, С. Н. Вдовченко***МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
В КОМПОЗИТЕ СИСТЕМЫ Ti-Al-Fe
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ*****Волгоградский государственный технический университет**e-mail: kulevich.vp@gmail.com, vgshmorgun@mail.ru,
bogdanov@vstu.ru, s.offi24@vk.com

Приведены результаты моделирования влияния толщин слоев в металлическом (Ti-Al-Fe) и металл-интерметаллидном (Ti-TiAl₃-Al-Fe₂Al₅-Fe) композитах на величину термических напряжений, возникающих на его межслойных границах после термообработки. Показано, что охлаждение трехслойного композита сталь 20880 + алюминий АД1 + титан ВТ1-0 с толщиной алюминиевого слоя менее 0,3 мм после отжига по режиму 640 °С, 1 ч, обеспечивающего формирование на границе сталь-алюминий диффузионной зоны, состоящей из двух прослоек (FeAl₃ и Fe₂Al₅) толщиной менее 50 мкм, а на границе алюминий-титан интерметаллида TiAl₃ толщиной 20 мкм, приводит к самопроизвольному отделению алюминиевого слоя от стального в результате разрушения интерметаллидной прослойки Fe₂Al₅, обусловленного действием растягивающих напряжений, превышающих ее предел текучести.

Ключевые слова: титан, алюминий, сталь, моделирование, напряжения

*V. P. Kulevich, V. G. Shmorgun, A. I. Bogdanov, S. N. Vdovchenko***MODELING OF THERMAL STRESSES IN A Ti-Al-Fe
COMPOSITE DURING COOLING AFTER HEAT TREATMENT****Volgograd State Technical University**

The article presents the results of modeling the effect of layer thicknesses in metallic (Ti-Al-Fe) and metal-intermetallic (Ti-TiAl₃-Al-Fe₂Al₅-Fe) composites on the magnitude of thermal stresses arising at their interlayer boundaries after heat treatment. It is shown that cooling of a three-layer composite of steel 20880 + aluminum AD1 + titanium VT1-0 with an aluminum layer thickness of less than 0.3 mm after annealing at 640°C for 1 h, which ensures the formation of a diffusion zone at the steel-aluminum boundary consisting of two interlayers (FeAl₃ and Fe₂Al₅) less than 50 μm thick, and at the aluminum-titanium boundary of the intermetallic compound TiAl₃ with a thickness of 20 μm, leads to spontaneous separation of the aluminum layer from the steel as a result of the destruction of the intermetallic layer Fe₂Al₅, caused by the action of tensile stresses exceeding its yield strength.

Keywords: titanium, aluminum, steel, modeling, stress

Введение

Предложенный на кафедре «Материаловедение и композиционные материалы» ВолгГТУ комплексный технологический процесс формирования на титане и сплавах на его основе покрытия из алюминидов титана включает следующую последовательность операций:

1. Изготовление с помощью сварки взрывом триметаллической заготовки Ti-Al-Fe.
2. Обработка давлением, позволяющая получить требуемую толщину алюминиевого слоя.
3. Предварительная термообработка, обеспечивающая отделение стального слоя.
4. Финишная термообработка, обеспечивающая формирование покрытия заданной толщины.

Такая последовательность операций позволяет реализовать высокую прочность сцепления покрытия с подложкой и максимально при-

близить форму получаемого материала или полужабриката к форме готового изделия.

Наиболее вероятной причиной самопроизвольного отделения стального слоя являются термические напряжения, возникающие при охлаждении композита из-за разницы в коэффициентах линейного расширения металлов, входящих в его состав. В рамках данной работы приведены результаты моделирования термических напряжений, возникающих в трехслойном композите (сталь-алюминий-титан) с наличием и отсутствием диффузионных зон на межслойных границах после финишной термической обработки.

Материалы и методы исследования

Для оценки температурных напряжений использовали пакет программ COMSOL Multiphysics, обладающий необходимой гибкостью в по-

становке связанных мультифизических задач и в задании граничных условий для отдельных слоев композита. COMSOL имеет готовый модуль Thermal Stress, позволяющий решать связанные задачи термоупругости. Имеется также встроенная библиотека материалов Material Library, применение которой, в большинстве случаев, не требует задания физических констант материалов и их зависимости от температуры.

Оценку термических напряжений производили при моделировании охлаждения слоистых композитов с температуры 600 до 20 °С.

При этом были сделаны следующие допущения:

- температура стали, титана, алюминия и диффузионной зоны равномерна по толщине;
- диффузионные зоны состоят из слоев с фазовым составом: Fe_2Al_5 – со стороны стали и TiAl_3 – со стороны титана;
- температурная зависимость КТЛР и модуль упругости отсутствует.

Были построены модели с различной толщиной слоев. Толщины стального и титанового слоев ($\delta_{\text{Fe}}=1,55$ мм и $\delta_{\text{Ti}}=2,9$ мм) были неизменны для всех моделей. Толщину алюминиевого слоя изменяли в соответствии со значе-

ниями, полученными на реальных образцах после обжатия: $\delta_{\text{Al}}=0,85; 0,5; 0,3$ мм. Ниже представлена табл. 1 с толщинами слоев в моделируемых композитах.

Таблица 1

Толщины слоев в моделируемых металлических композитах, мм

Материал слоя	KM1	KM2	KM3
Fe	1,55	1,55	1,55
Al	0,85	0,5	0,3
Ti	2,9	2,9	2,9

При построении моделей металл-интерметаллидного композита, как и в случае металлического композита были взяты неизменные толщины стального и титанового слоев ($\delta_{\text{Fe}}=1,55$ мм и $\delta_{\text{Ti}}=2,9$ мм). Интерметаллидный слой со стороны титанового слоя в моделях также имел фиксированную толщину ($\delta_{\text{TiAl}_3}=0,03$ мм). Толщину алюминиевого слоя изменяли в диапазоне: $\delta_{\text{Al}}=0,85; 0,3$ мм. Толщину интерметаллидного слоя со стороны стали изменяли в диапазоне: $\delta_{\text{Fe}_2\text{Al}_5}=0,2; 0,1; 0,05; 0,03$ мм. Толщины слоев в моделируемых металл-интерметаллидных композитах представлены в табл. 2.

Таблица 2

Толщины слоев в моделируемых металл-интерметаллидных композитах, мм

Материал слоя	ИК1	ИК2	ИК3	ИК4	ИК5	ИК6	ИК7
Fe	1,55						
Fe ₂ Al ₅	0,1	0,05	0,03	0,2	0,1	0,05	0,03
Al	0,85				0,3		
TiAl ₃	0,03						
Ti	2,9						

Свойства металлических слоев были заданы из встроенной в *COMSOL Multiphysics* библиотеки материалов. Для металлов ВТ1-0, АД1 и Сталь 20880 подбирались наиболее близкие из имеющихся в библиотеке аналогов: Ti Grade 1, Al 1050 и Armco iron. Свойства интерметал-

лидных слоев задавались вручную на основании литературных данных [1–4].

Для решения поставленной задачи были построены геометрические модели, представленные на рис. 1.

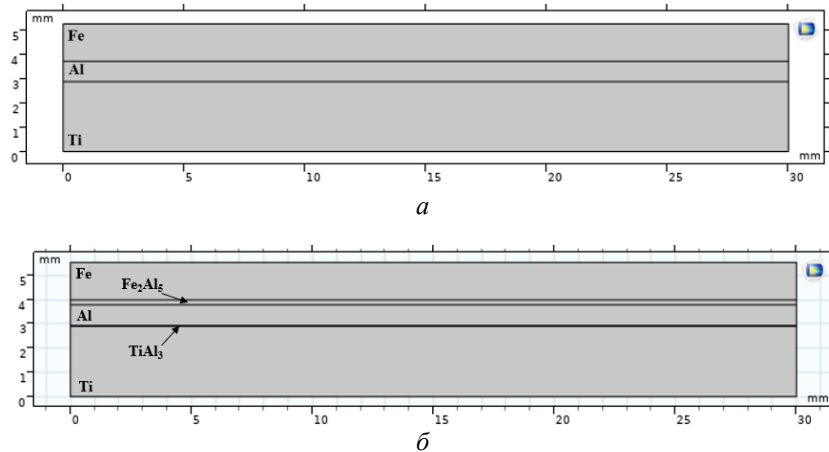


Рис. 1. Геометрия модели трехслойного металлического композита Ti-Al-Fe (а) и пятислойного Ti-TiAl₃-Al-Fe₂Al₅-Fe металл-интерметаллидного композита (б)

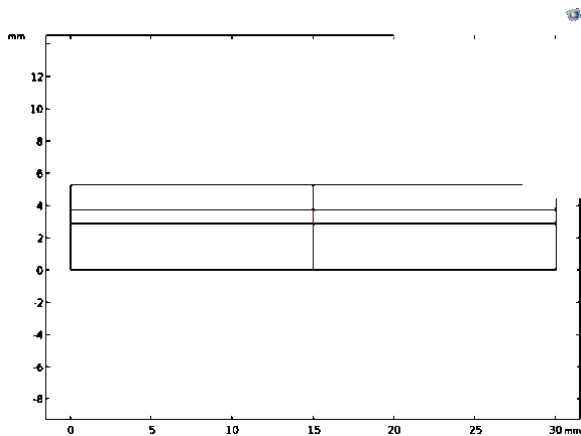


Рис. 2. Расположение секущей линии для считывания напряжений и деформаций

Графические распределения напряжений и деформаций для всех композитов снимали по секущей линии в центре образца (рис. 2) для исключения краевых эффектов.

Результаты и их обсуждение

В трехслойном композите при охлаждении с температуры 600 °С наблюдаются значительные напряжения в стальном и титановом слоях (von Mises stress) (рис. 3–5). Наблюдаемые напряжения вызваны более высокой пластической деформацией алюминиевого слоя относительно других слоев (рис. 3–5, в). В результате чего при переходе между слоями напряжения изменяются скачкообразно. (рис. 3–5, б).

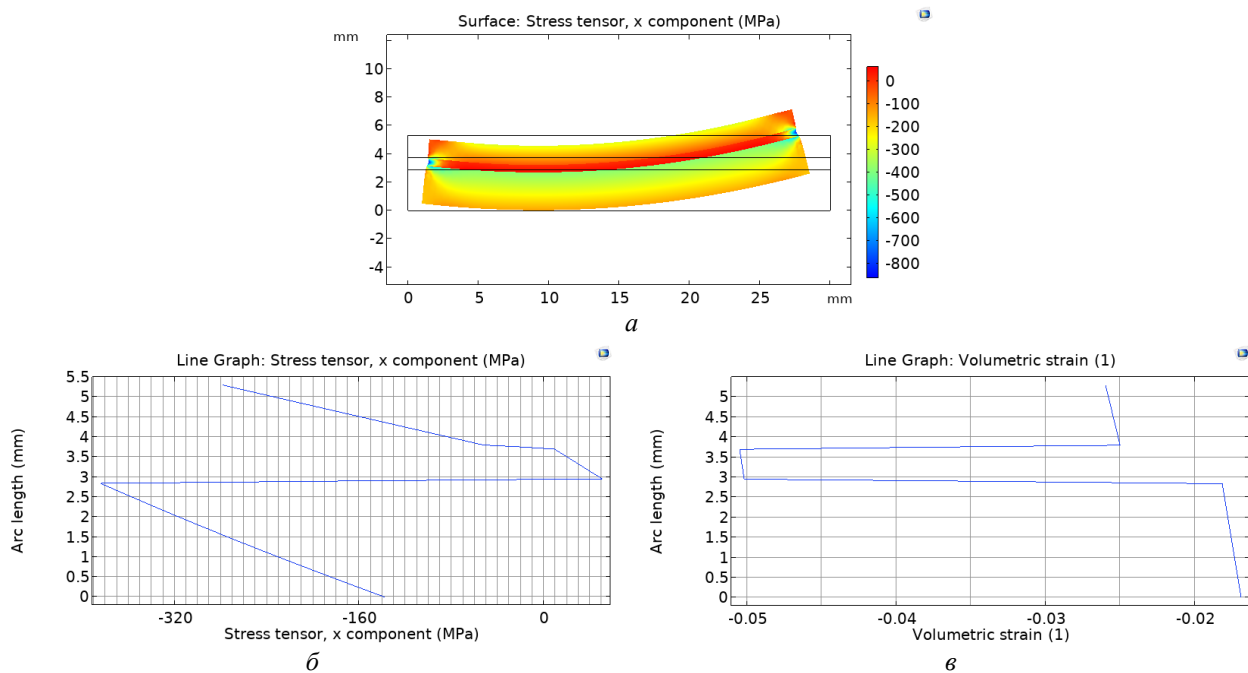


Рис. 3. Распределение напряжений по сечению КМ1 ($\delta_{Al}=0,85$ мм) после охлаждения с температуры 600 °С (а), графики распределения напряжений (б) и деформаций (в)

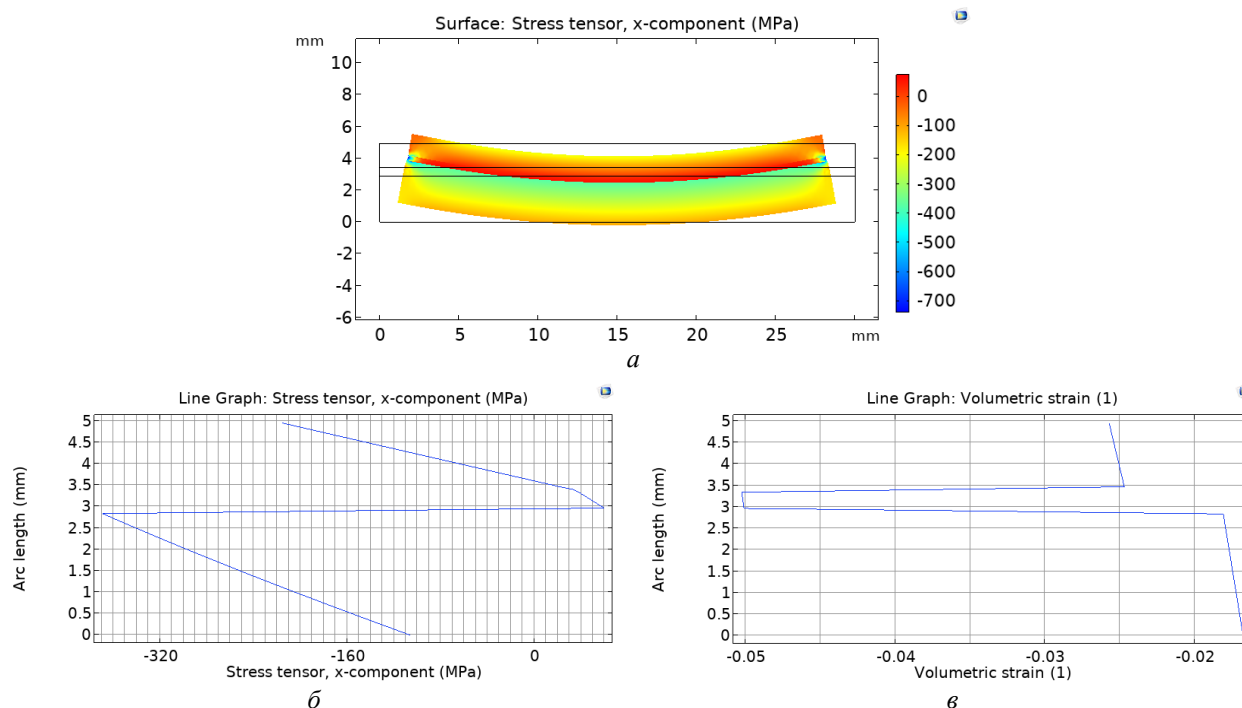


Рис. 4. Распределение напряжений по сечению КМ1 ($\delta_{Al}=0,5$ мм) после охлаждения с температуры 600 °С (а), графики распределения напряжений (б) и деформаций (в)

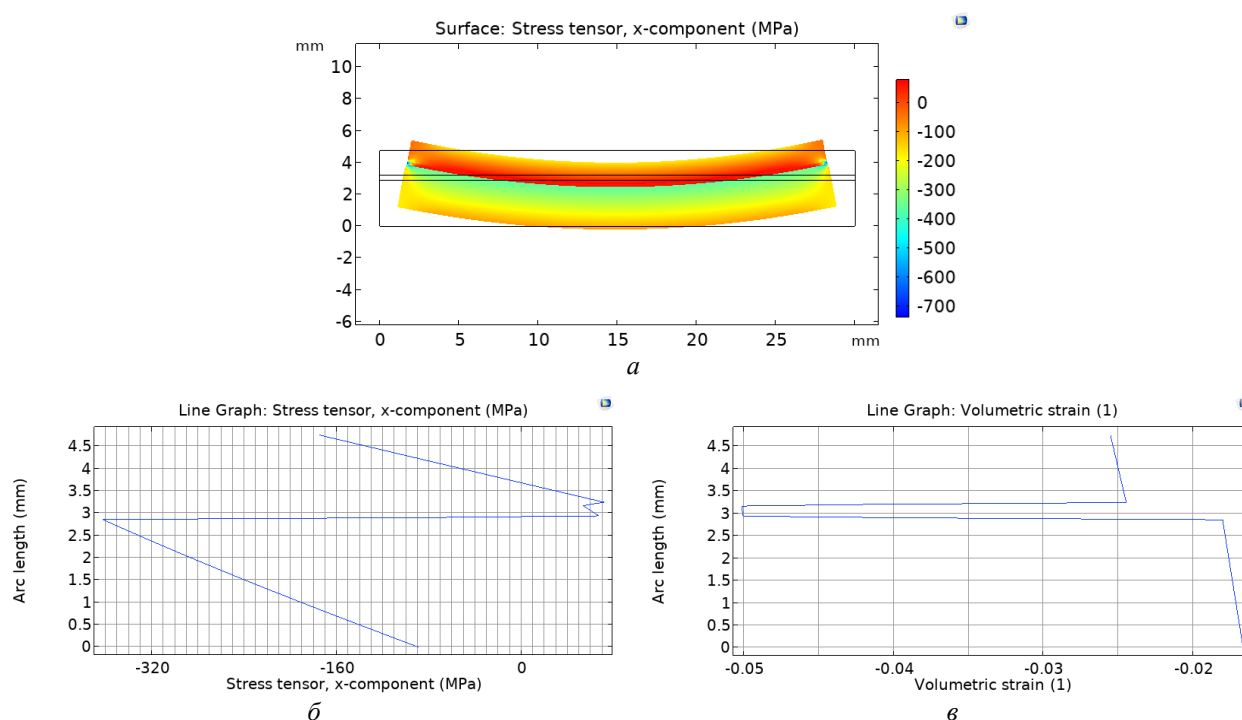


Рис. 5. Распределение напряжений по сечению КМ1 ($\delta_{Al}=0,3$ мм) после охлаждения с температуры 600 °С (а), графики распределения напряжений (б) и деформаций (в)

Рассмотрение распределения горизонтальной составляющей напряжений по сечению композита (рис. 3–5, б) показало, что в стальном и титановом слоях возникают сжимающие напряжения, в то время как в алюминиевом слое – растягивающие. Уменьшение толщины

алюминиевого слоя в исследованном диапазоне приводит к снижению сжимающих напряжений в стальном слое и росту растягивающих напряжений в алюминиевом слое. Напряжения в титановом слое изменяются незначительно.

Анализ напряженного состояния металл-ин-

терметаллидного композита после охлаждения с 600 °С показал, что наиболее высокие напряжения возникают в интерметаллиде Fe_2Al_5 (рис. 6–9).

Из распределений x -составляющей напряжений и деформаций видно, что в композите преобладают сжимающие напряжения с пиком в области интерметаллида Fe_2Al_5 . Изменение толщины интерметаллидного слоя при посто-

янной толщине алюминия приводит к незначительному снижению уровня сжимающих напряжений в интерметаллиде, однако принципиальных изменений в напряженном состоянии композита не происходит.

Напряжения в интерметаллидном слое TiAl_3 со стороны титана также достаточно высокие, но градиент между интерметаллидом и титановым слоем меньше, чем между Fe_2Al_5 и сталью.

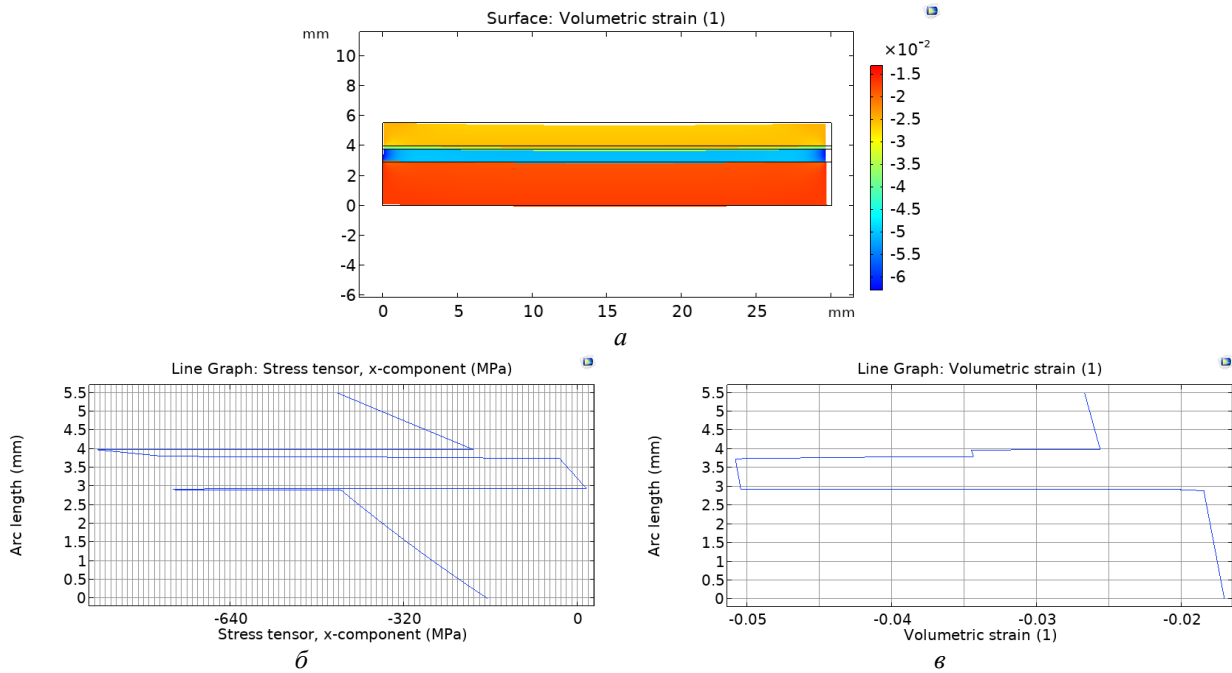


Рис. 6. Распределение напряжений по сечению ИК4 ($\delta_{\text{Al}}=0,85$ мм, $\delta_{\text{Fe}_2\text{Al}_5}=0,2$ мм после охлаждения с температуры 600 °С (а), графики распределения x -составляющей (б) и деформаций (в)

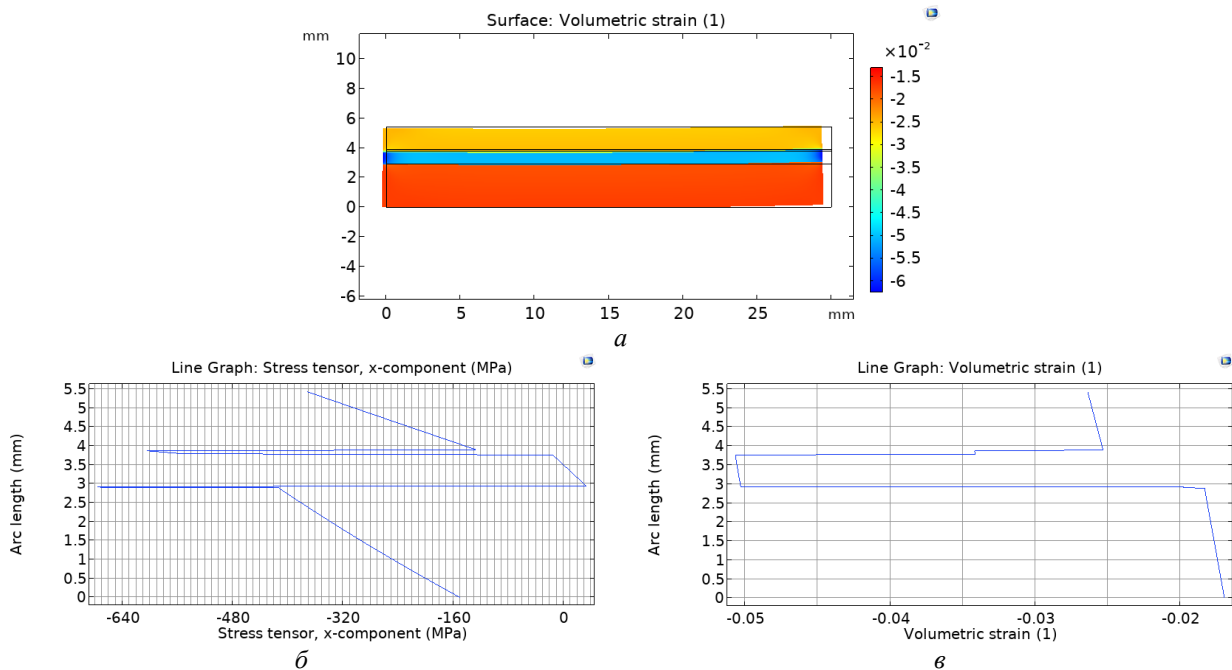


Рис. 7. Распределение напряжений по сечению ИК1 ($\delta_{\text{Al}}=0,85$ мм, $\delta_{\text{Fe}_2\text{Al}_5}=0,1$ мм) после охлаждения с температуры 600 °С (а), графики распределения x -составляющей (б) и деформаций (в)

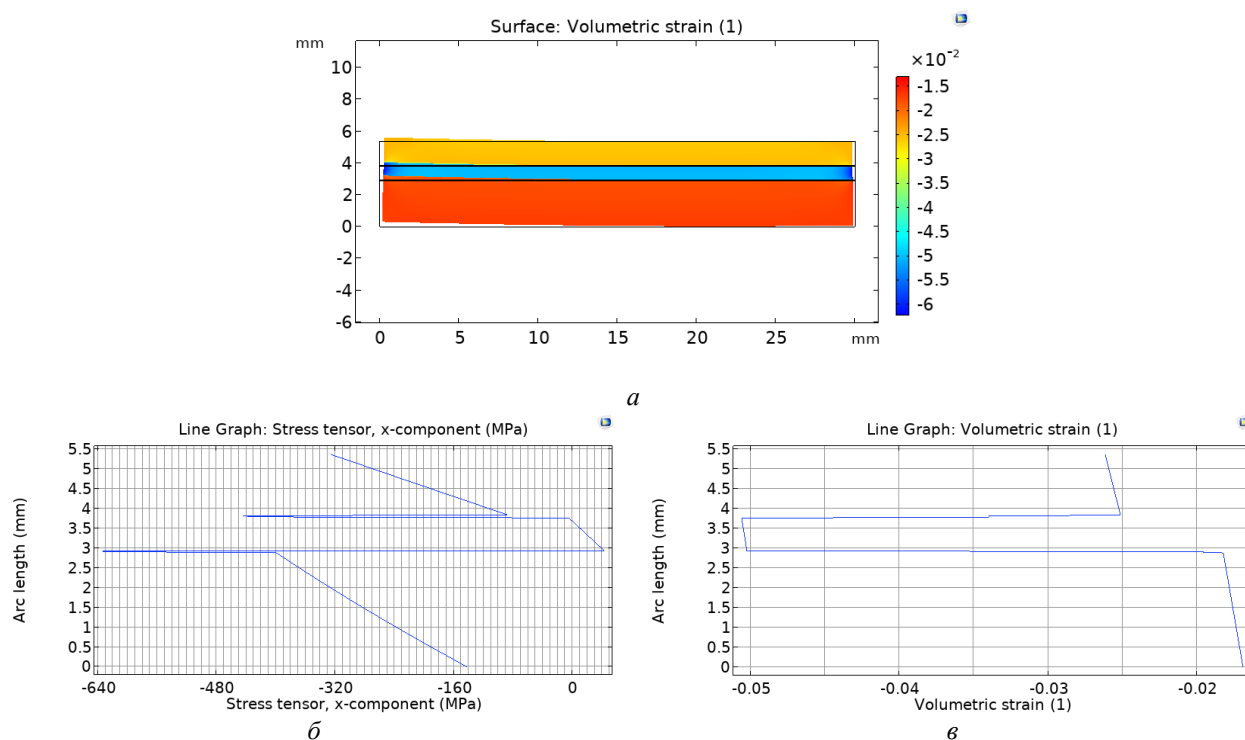


Рис. 8. Распределение напряжений по сечению ИК2 ($\delta_{Al}=0,85$ мм, $\delta_{Fe_2Al_5}=0,05$ мм) после охлаждения с температуры 600 °С (а), графики распределения x -составляющей (б) и деформаций (в)

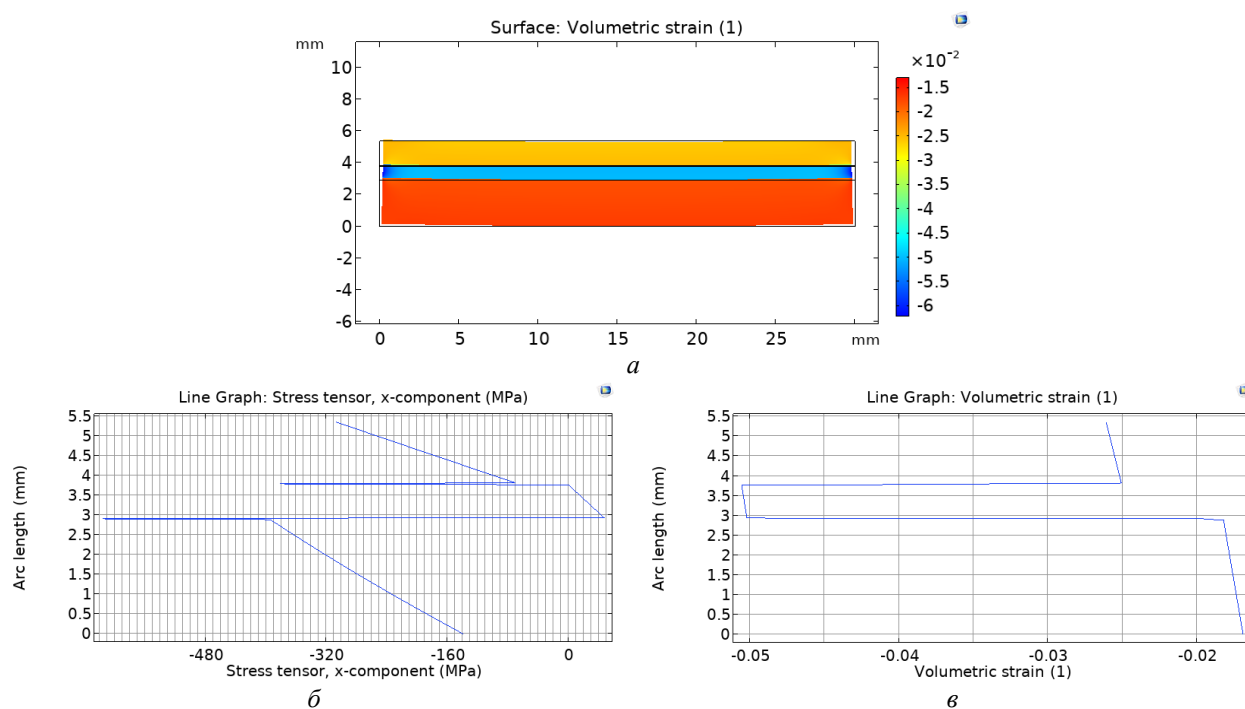


Рис. 9. Распределение напряжений по сечению ИК3 ($\delta_{Al}=0,85$ мм, $\delta_{Fe_2Al_5}=0,03$ мм) после охлаждения с температуры 600 °С (а), графики распределения x -составляющей (б) и деформаций (в)

Снижение толщины алюминиевого слоя привело к снижению сжимающих напряжений в интерметаллиде Fe_2Al_5 в направлении x , а y -составляющая напряжений осталась неиз-

менно высокой (рис. 10–12). При этом наблюдается значительное снижение x -составляющей напряжений в Fe_2Al_5 при снижении его толщины (при $\delta_{Al}=0,3$ мм).

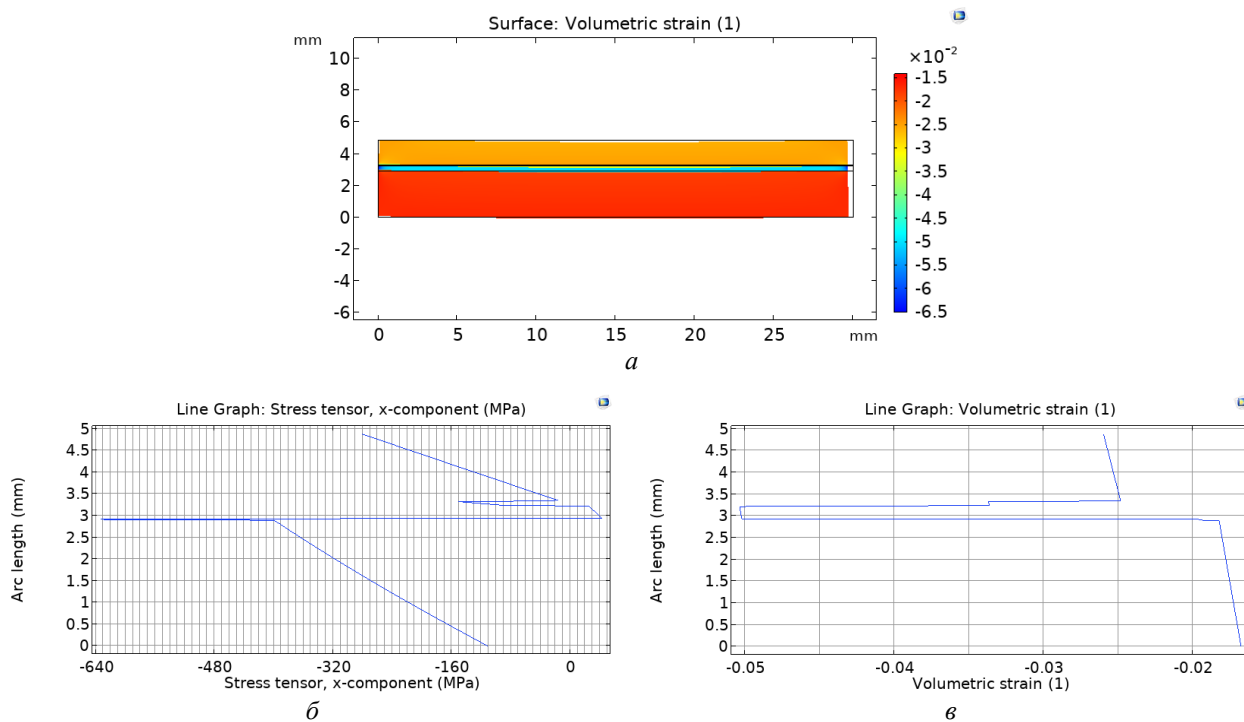


Рис. 10. Распределение напряжений по сечению ИК5 ($\delta_{Al}=0,3$ мм, $\delta_{Fe2Al5}=0,1$ мм) после охлаждения с температуры 600 °С (а), графики распределения x -составляющей (б) и деформаций (в)

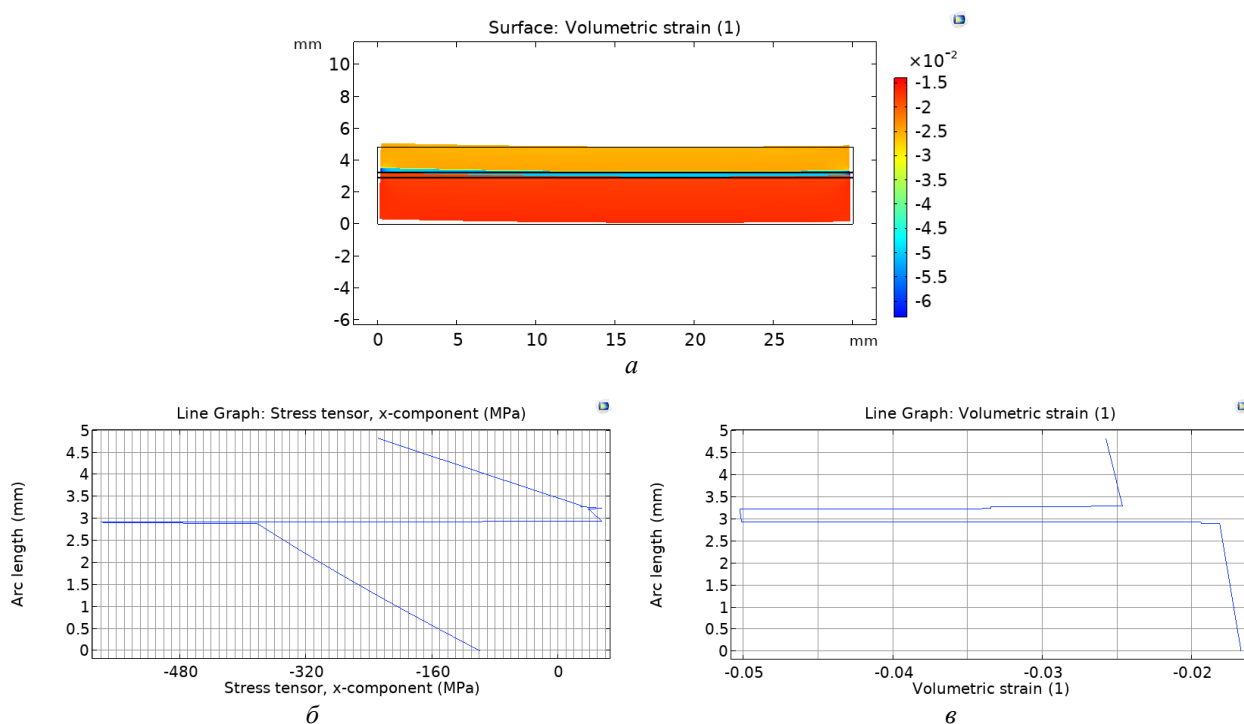


Рис. 11. Распределение напряжений по сечению ИК6 ($\delta_{Al}=0,3$ мм, $\delta_{Fe2Al5}=0,05$ мм) после охлаждения с температуры 600 °С (а), графики распределения x -составляющей (б) и деформаций (в)

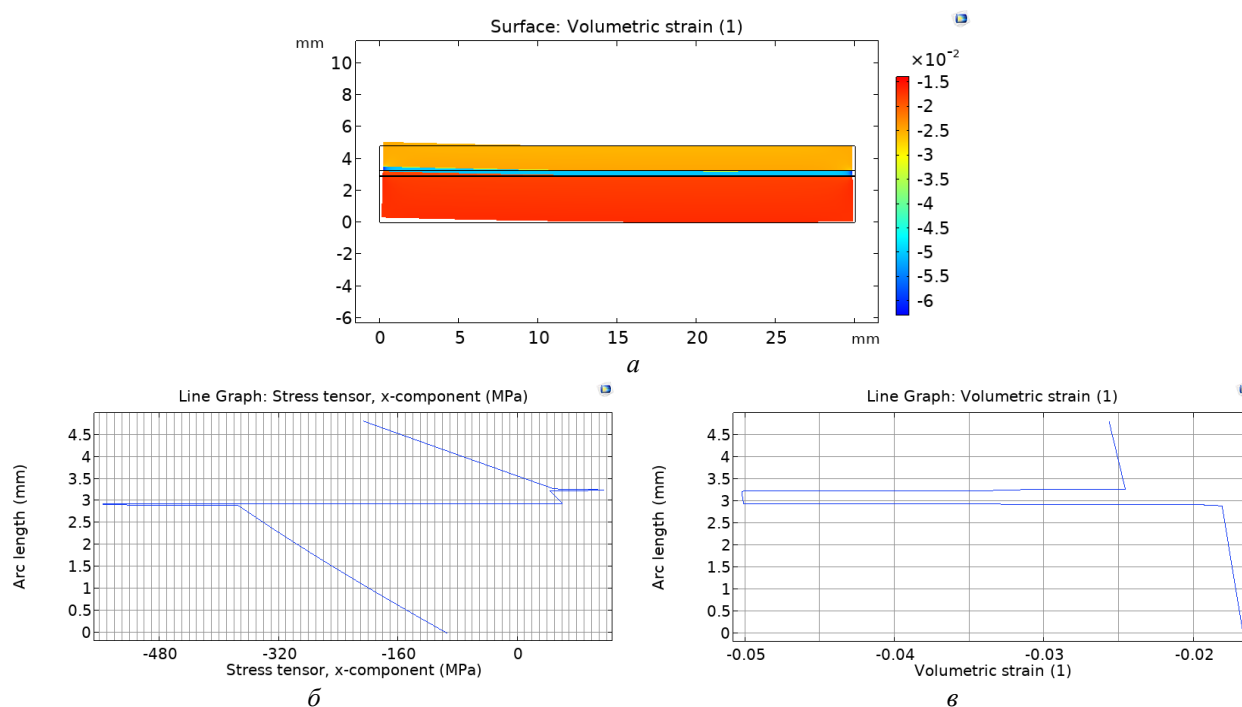


Рис. 12. Распределение напряжений по сечению ИК7 ($\delta_{Al}=0,3$ мм, $\delta_{Fe2Al5}=0,03$ мм) после охлаждения с температуры 600 °С (а), графики распределения x-составляющей (б) и деформаций (в)

Из рис. 13 видно, что при охлаждении композита, он испытывает значительные деформации. Величина смещения композита возрастает

от титанового слоя к поверхности стали и достигает 0,22–0,23 мм.

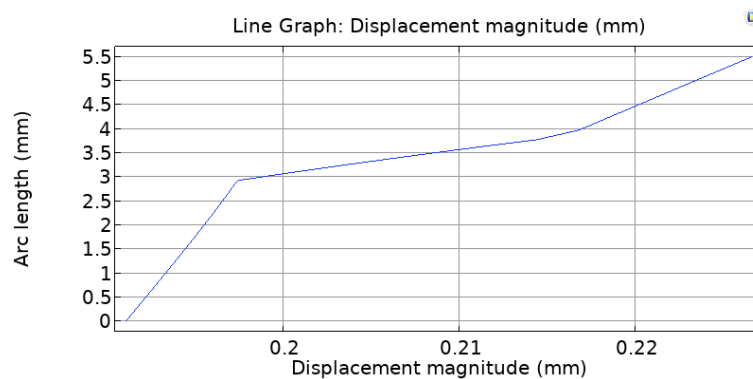


Рис. 13. Сдвиг (величина смещения) по сечению ИК4 ($\delta_{Al}=0,85$ мм, $\delta_{Fe2Al5}=0,02$ мм)

Результаты проведенного моделирования и построенные распределения напряжений в слоистом композите подтверждаются наблюдаемыми на реальных образцах эффектами, а именно самопроизвольным расслоением ком-

позиции ВТ1-0+АД1+Сталь20880 за счет разрушения интерметаллида Fe_2Al_5 (рис. 15) при толщине алюминиевого слоя менее 0,3 мм и толщине Fe_2Al_5 менее 0,05 мм.

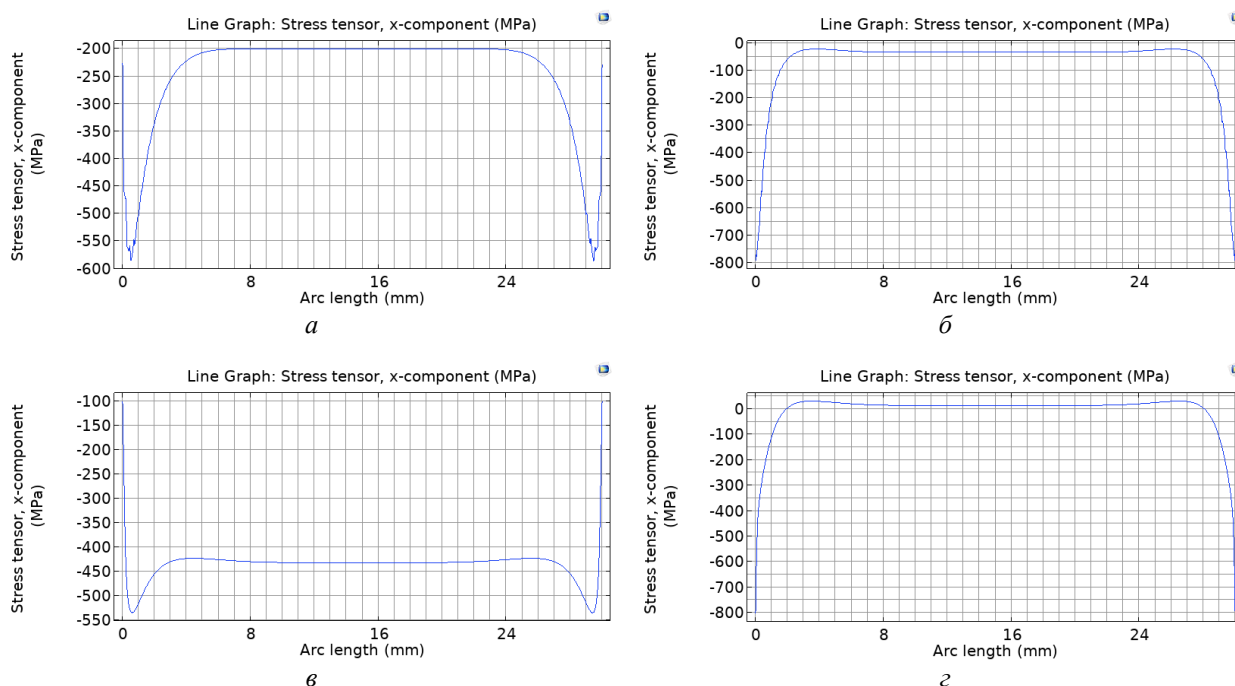


Рис. 14. Распределение напряжений по сечению ИК4 ($\delta_{Al}=0,85$ мм, $\delta_{Fe2Al5}=0,02$ мм) в (а) Fe по границе с Al, (б) Al по границе с Fe, (в) Ti по границе с Al, (г) Al по границе с Ti

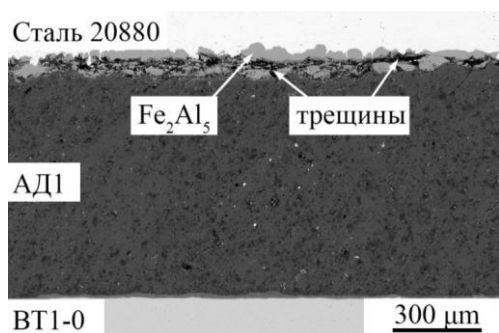


Рис. 15. Структура слоистого композита BT1-0+АД1+Сталь20880 после термообработки при 600 °С, 1 ч

При таких условиях в интерметаллидном Fe_2Al_5 слое возникают растягивающие напряжения, что приводит к его разрушению и самопроизвольному отделению стального слоя.

Увеличение толщины алюминиевого и интерметаллидного Fe_2Al_5 слоев при прочих равных условиях приводит к появлению сжимающих напряжений в интерметаллидной прослойке и отсутствию самопроизвольного отделения стального слоя.

Выводы

Охлаждение трехслойного композита сталь 20880 + алюминий АД1 + титан BT1-0 с толщиной алюминиевого слоя менее 0,3 мм после термообработки (640 °С, 1 ч), обеспечивающей формирование на границе сталь-алюминий слоистой диффузионной зоны ($FeAl_3$ и Fe_2Al_5)

толщиной менее 50 мкм, а на границе алюминий-титан – интерметаллида $TiAl_3$ толщиной 20 мкм, приводит к самопроизвольному отделению алюминиевого слоя от стального в результате разрушения интерметаллидной прослойки Fe_2Al_5 , обусловленного действием растягивающих напряжений, превышающих ее предел текучести.

Увеличение толщины алюминиевого и интерметаллидного Fe_2Al_5 слоев при прочих равных условиях приводит к появлению сжимающих напряжений в интерметаллидной прослойке и отсутствию самопроизвольного отделения стального слоя.

Полученный результат является чрезвычайно важным с точки зрения технологии формирования алитированного слоя на поверхности титана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tobita K. et al. Effect of anomalous crystal structure of iron aluminides Fe_2Al_5 and Fe_4Al_{13} : low phonon thermal conductivity and potentiality as thermoelectric materials // Materials Transactions. – 2016. – Т. 57. – №. 7. – С. 1045-1049.
2. Zienert T. et al. Heat capacity of η -AlFe (Fe_2Al_5) // Intermetallics. – 2016. – Т. 77. – С. 14-22.
3. Duan Y. H., Sun Y., Lu L. Thermodynamic properties and thermal conductivities of $TiAl_3$ -type intermetallics in Al-Pt-Ti system // Computational materials science. – 2013. – Т. 68. – С. 229-233.
4. Lopis A. S., Reynolds Q. G., Bisaka K. Computational simulation of molten titanium-aluminium metal and alloys // Conference of Metallurgistics. – 2010.