

Е.Г. САВЧЕНКО, инженер ЗАО МИДАУС

В.М. СТУЧЕБНИКОВ, д-р техн. наук, профессор, ген. директор ЗАО МИДАУС

Пайка чувствительных элементов в преобразователях давления на основе структур «кремний на сапфире».

1. Паяное соединение сапфира с титановым сплавом.

Тензорезисторные преобразователи (ТП) давления на основе гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире» (КНС) [1] обладают рядом преимуществ в сравнении с другими микроэлектронными тензорезисторными преобразователями [2]. Обычно при производстве ТП на основе КНС сапфировые подложки полупроводниковых чувствительных элементов (ПЧЭ) напаиваются на мембраны из титанового сплава с помощью припоя на основе серебра. Из-за различных коэффициентов теплового расширения материала мембраны и подложки в ПЧЭ, мембране и соединительном слое после высокотемпературной пайки возникают значительные термические напряжения, которые приводят к появлению температурной погрешности преобразования. Кроме того, эти напряжения могут быть источниками нестабильности и гистерезисных явлений в ТП. Поскольку сапфировая подложка представляет собой монокристалл, а титановые сплавы сохраняют упругие характеристики в широком диапазоне деформаций, то представляется, что соединительный слой может быть основным источником нежелательных характеристик ТП. Несмотря на то, что ТП давления на основе КНС используются уже сорок лет, свойства соединительного слоя остаются практически неизвестными.

Попытки жесткого соединения ПЧЭ на основе КНС с другими материалами заканчивались неудачей. Успешной была лишь пайка ПЧЭ стеклом на алюмосиликатную керамику; полученные ТП имели хорошие характеристики, но ограниченную область применения [1,3].

С появлением аморфных припоев СТЕМЕТ [4] открылись новые возможности соединения сапфира с другими материалами, а также ранее не соединяемых пайкой материалов друг с другом. В ПГ МИДА ведутся работы по исследованию новых возможностей пайки при производстве ТП давления на основе КНС. В настоящей работе проведено исследование состава и микротвёрдости соединительного слоя титанового сплава ВТ-6 (Ti-6Al-4V) с сапфиром (Al_2O_3), полученного стандартной пайкой припоем ПСр 72 (72Ag-28Cu), а также пайкой аморфным припоем СТЕМЕТ.

Пайка сапфира на титановый сплав ВТ-6 припоем ПСр-72.

Пайка ПЧЭ на титановые мембраны проводилась в вакууме по стандартной технологии. После пайки были приготовлены косые шлифы под углом $\sim 1^\circ$ (рис.1). Ниже представлены типичные результаты исследований.

Исследование распределения элементов в соединительном слое проводилось с помощью электронно-зондового микроанализатора MAP-4. Путь сканирования указан на рис.2а, распределение элементов вдоль этого пути – на рис.2б.

Распределение элементов получено с шагом 70 мкм (50 точек). Граница сапфира неровная, имеет вкрапления припоя и титана. На рис.2 хорошо видно соответствие

массовой доли элементов и цвета на электронно-микроскопических изображениях. Толщина соединительного слоя с учётом угла шлифования составила около 30 мкм.

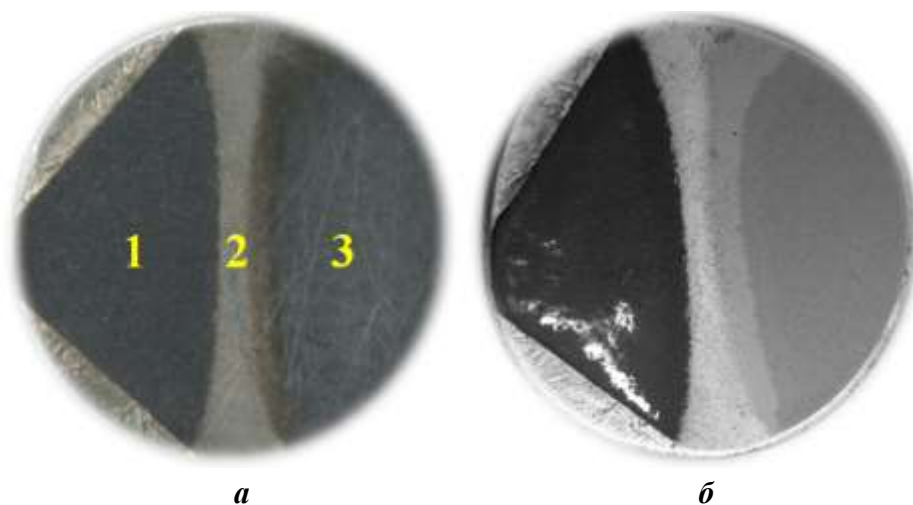
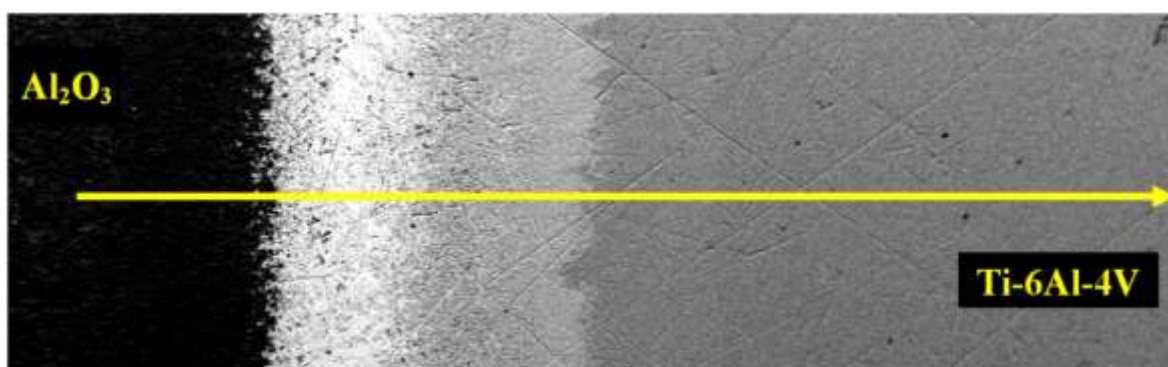
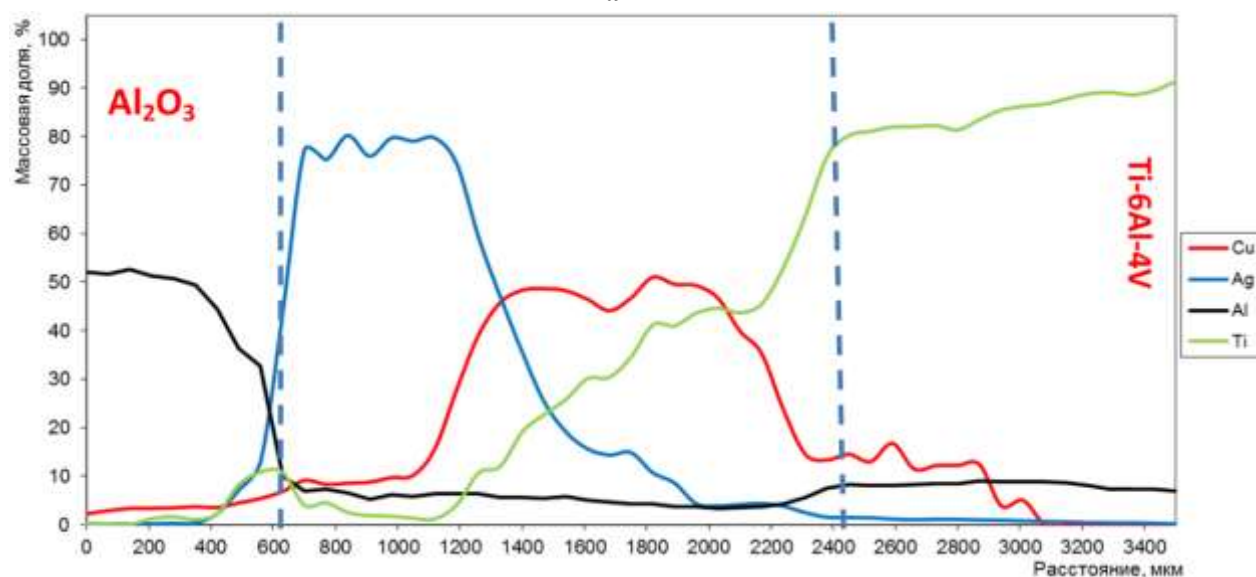


Рис. 1. Оптическое (а) и электронно-микроскопическое (б) изображение косого шлифа.
1 - сапфир (Al_2O_3); 2 – слой припоя;
3 – мембрана из титанового сплава ВТ-6.



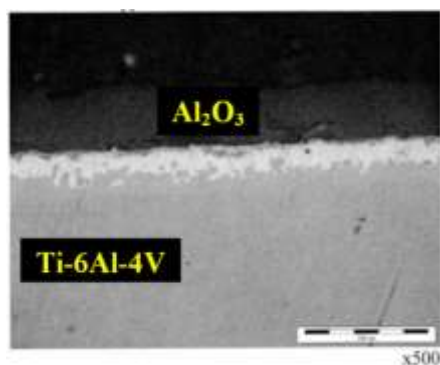
а



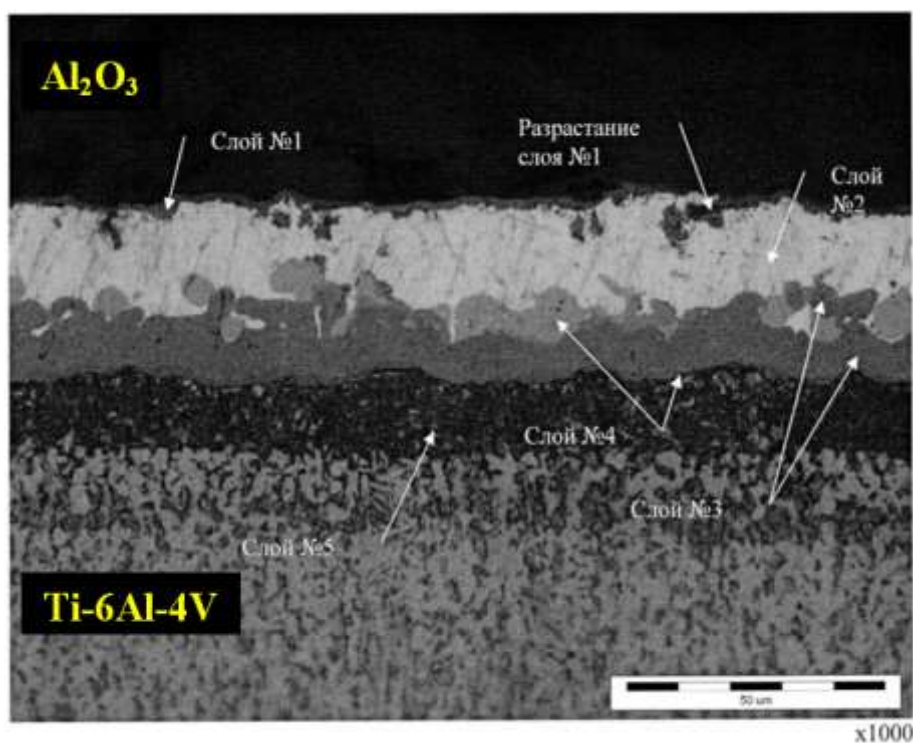
б

Рис. 2. а) Электронно-микроскопическое изображение места исследования с указанием пути сканирования. б) Распределение элементов в соединительном слое (вертикальными линиями отмечены границы слоя).

Исследованный образец был разрезан на электроэрозионном станке перпендикулярно к соединительному слою. Вид слоя после разрезания и последующего травления в однопроцентном растворе плавиковой кислоты показан на рис.5. Травление выявляет более сложную структуру соединительного слоя. Условно можно выделить пять слоёв по толщине соединительного слоя, причём слои проникают один в другой. Более определённые суждения о природе этих слоёв требуют проведения фазового анализа.



a



б

Рис. 5. Оптическое изображение переходного слоя до (а) и после (б) травления.

Толщины слоёв рис.5:

Слой №1 – $h=1,5-1,7$ мкм, наблюдается единичное «разрастание» в слой №2;

Слой №2 – $h=17,5-21$ мкм, единичные включения слоя №3 и слоя №4;

Слой №3 – $h=9,5-13,2$ мкм;

Слой №4 – $h=1-1,6$ мкм;

Слой №5 – $h=11-16$ мкм.

Общая толщина соединительного слоя ≈ 30 мкм, что хорошо согласуется с величиной, определённой на косом шлифе.

Пайка сапфира на титановый сплав ВТ-6 припоем СТЕМЕТ.

Для получения соединения титанового сплава ВТ-6 с лейкосапфиром использовался аморфный припой СТЕМЕТ 1410 системы $Zr-5,5Fe-3,5Be-1Nb-5Cu-2Sn-0,4Cr-1Ge$ в виде фольги толщиной 50 мкм. (Отметим, что попытка пайки припоем СТЕМЕТ на основе титана оказалась неудачной – сапфир при охлаждении разрушался). Физико-химические качества аморфных припоев обуславливают значительно более высокую диффузионную и капиллярную активность по сравнению с кристаллическими аналогами, а также превосходную гибкость. Быстрое затвердевание сужает интервалы плавления и кристаллизации, что в сочетании с малой толщиной (20...50 мкм) обеспечивает «мгновенное» равномерное плавление припоя по всему объему [4]. Аморфность структуры должна повышать однородность соединительного слоя как по толщине, так и по площади, а отсутствие мягкого серебра – увеличивать прочность соединения.

Пайка проводилась в вакууме по стандартной технологии. При визуальном осмотре паяных соединений было отмечено хорошее смачивание соединяемых материалов. Исследования проводились на косых шлифах аналогичных описанным выше. (рис.6). К сожалению, из-за малых размеров образца шлиф не вышел на титановый сплав мембраны. Тем не менее, видно, что, в отличие от пайки серебросодержащим припоем, соединительный слой однороден по внешнему виду.

Однородность соединительного слоя подтверждается и измерением распределения состава по толщине слоя (рис.7). Локальное повышение концентрации алюминия вблизи сапфира связано, очевидно, с вкраплением сапфира в соединительный слой (рис.7а). Во всём слое наблюдается присутствие титана, очевидно диффундирующего из мембраны; как и в предыдущем случае, концентрация титана повышается у границы с сапфиром.

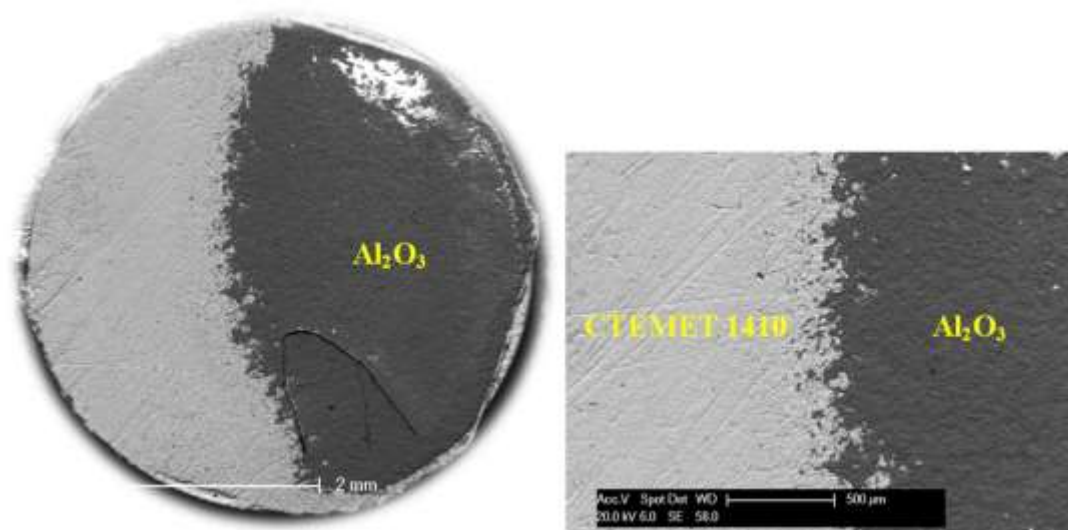
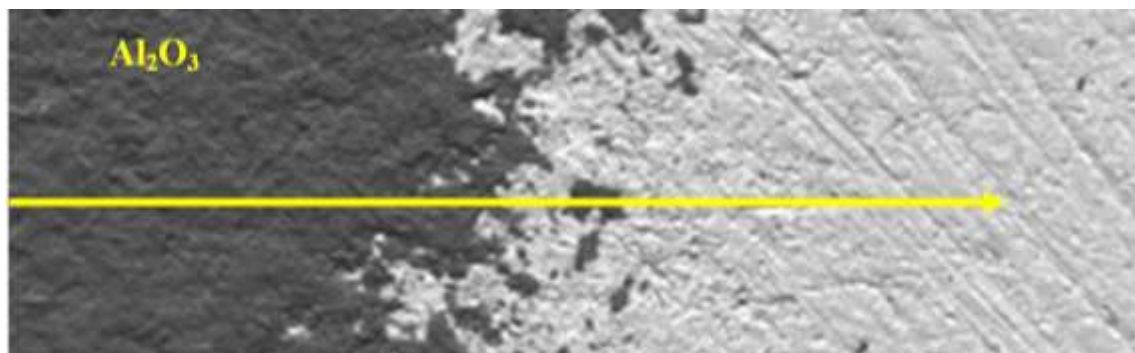
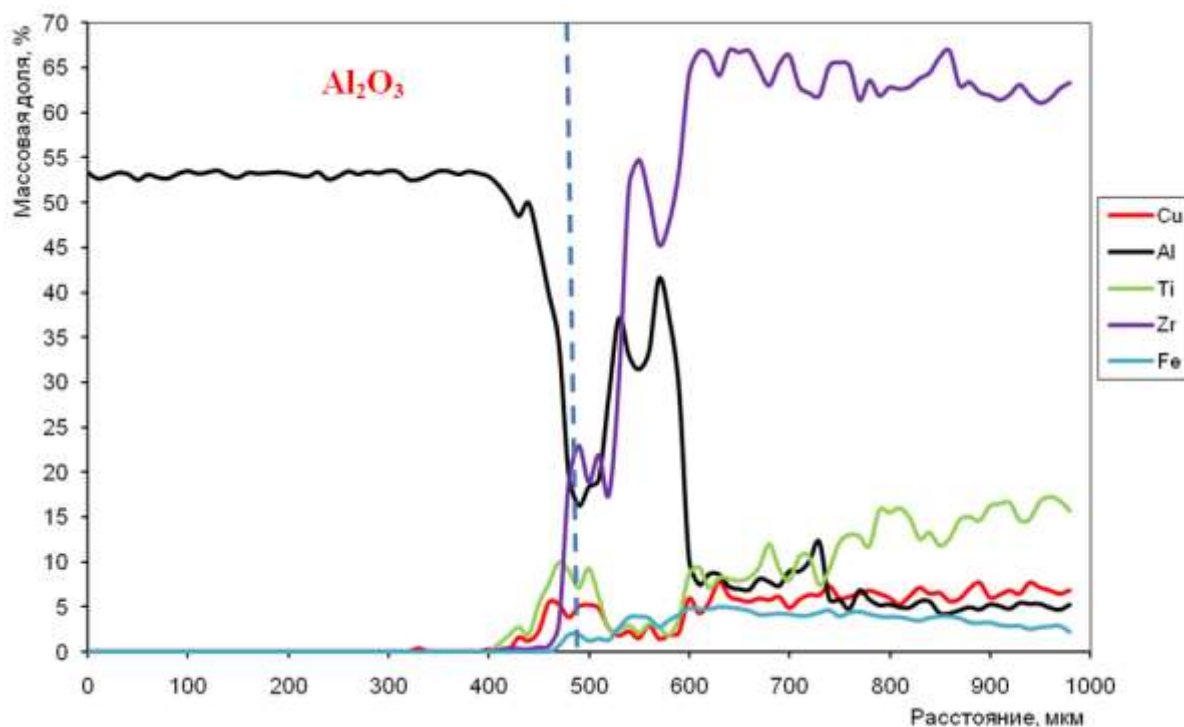


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение косого шлифа (угол $0,94^{\circ}$) образца.



а



б

Рис. 7. *а) Электронно-микроскопическое изображение места исследования с указанием пути сканирования. б) Распределение элементов в соединительном слое (вертикальными линиями отмечены границы слоя).*

Измерение микротвёрдости также свидетельствует об однородности соединительного слоя (рис.8). Твёрдость соединительного слоя практически одинакова по всей толщине и несколько выше твёрдости сплава ВТ-6, из которого изготовлена мембрана. Это даёт основания полагать, что такие недостатки ТП, как вариация, температурный гистерезис и временная нестабильность, должны уменьшиться при использовании пайки ПЧЭ на титановые мембраны припоем СТЕМЕТ вместо ПСр-72.

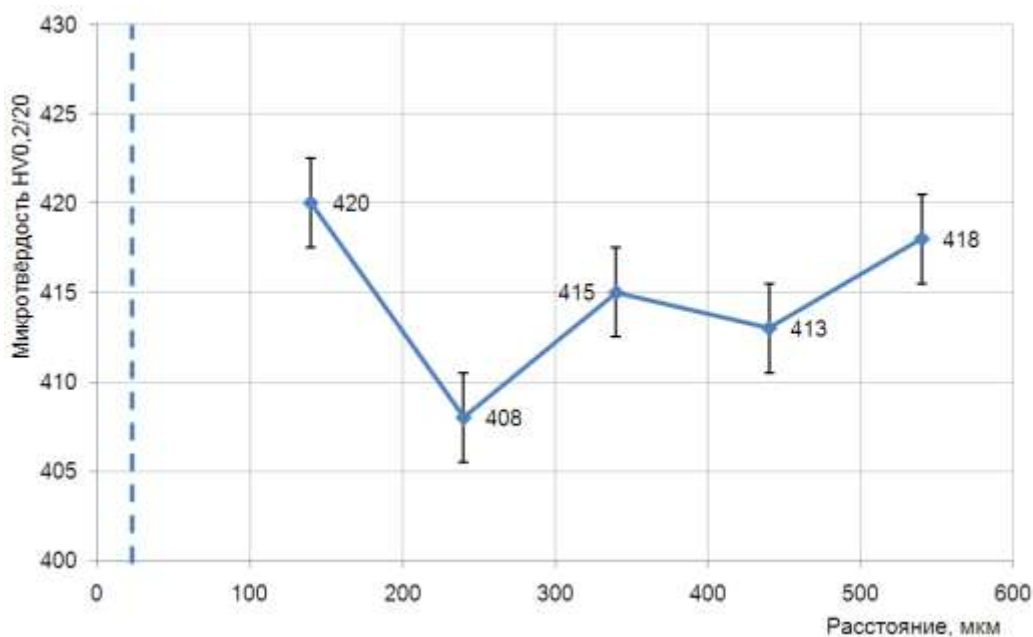


Рис.8. Распределение микротвёрдости в соединительном слое при пайке СТЕМЕТОм.

Выводы.

Проведённые исследования показали, что соединительный слой между титановой мембраной и сапфировой подложкой ПЧЭ в тензопреобразователях давления на основе структур КНС, полученных стандартной пайкой припоем ПСр 72, сильно неоднороден по составу и механическим характеристикам: составляющие припоя серебро и медь разделяются и перемещаются соответственно к сапфиру и титану. В результате вблизи сапфира образуется мягкий слой, который может пластически деформироваться, оказывая отрицательное влияние на характеристики ТП.

Показано также, что аморфный припой СТЕМЕТ 1410 с успехом может заменить ПСр 72 при производстве ТП на основе КНС с титановыми мембранами, образуя однородный по толщине соединительный слой с высокой твёрдостью. В дальнейшем необходимо провести детальное сравнение ТП давления на основе КНС с двумя видами паяного соединения.

Авторы благодарят А.Л. Очеретянского за участие в микроструктурном анализе образцов.

Список литературы

1. Стучебников В.М. // Структуры «Кремний на сапфире» как материал для тензопреобразователей механических величин. – Радиотехника и электроника, 2005, т.50, №6, с.678-696.
2. Ваганов В.И. // Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоиздат, 1983. 136с.
3. Папков Н.С., Папков В.С., Стучебников В.М. // Нелинейность механического преобразования в микроэлектронных датчиках давления. – Датчики и системы, 1999, №5, с.30-34.

4. <http://stemet.ru/rd.htm> СТЕМЕТ® – зарегистрированный товарный знак предприятия МИФИ-АМЕТО
5. Диаграммы состояния металлических систем: сб. ст. / Акад. наук СССР, Ин-т металлургии им. А. А. Байкова ; ред.: Н. В. Агеев, О. С. Иванов. - М. : Наука, 1971. – 270 с.