

УДК 620.172/.178.2

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ И ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ СИТАЛЛА СО-115М НА ПРОЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Н.В. Тихменев^{a,b}, С.А. Закурнаев^a, А.В. Озаренко^a, В.С. Быстрицкий^a, С.А. Мягков^a,
Р.А. Столяров^a, К.Е. Четов^a, С.Е. Коршунов^a

^a ПАО «Электроприбор», Тамбов, 392000, Российская Федерация

^b ОАО ГосНИИП, Москва, 129226, Российская Федерация

Адрес для переписки: stolyarova@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 06.05.16, принята к печати 23.05.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-613-619

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Тихменев Н.В., Закурнаев С.А., Озаренко А.В., Быстрицкий В.С., Мягков С.А., Столяров Р.А., Четов К.Е., Коршунов С.Е. Влияние методов обработки и очистки поверхности ситалла СО-115М на прочность оптического контакта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 613–619. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-613-619

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты исследования оптического контакта деталей из ситалла марки СО-115М. В серийно выпускаемых лазерных гироскопах основным методом соединения деталей из ситалла марки СО-115М является оптический контакт. Существующая технология имеет ряд нерешенных вопросов, связанных с прочностью оптического контакта, которые определяют герметичность внутреннего объема лазерного датчика.

Метод. Контроль механической прочности оптического контакта заключался в измерении удельного усилия разрыва соединения. Механические испытания на прочность проведены с помощью разрывной испытательной машины РМИ-250. При механических испытаниях к образцам прикладывали равномерно нарастающую нагрузку 50 Н/с. Фиксировалось значение, при котором происходит разрушение оптического контакта. **Основные результаты.** Показано, что одним из основных факторов, определяющих механическую прочность соединения, является чистота соединяемых поверхностей. Выполнено сравнение влияния различных методик очистки поверхности оптических элементов на прочность оптического контакта. Показано отрицательное влияние даже непродолжительного хранения оптических деталей после мойки на прочность сборки. Введение дополнительной операции механической полировки поверхностей перед их соединением у оптических деталей, которые находились на хранении, позволило значительно уменьшить разброс значений механической прочности оптических контактов. Экспериментально установлено, что прогрев сборки оптических элементов в вакууме при температуре 300 °С приводит к увеличению прочности соединения в 2 раза. При этом оптический контакт остается разъемным. **Практическая значимость.** Проведенные исследования дают возможность улучшить технические и эксплуатационные характеристики лазерных гироскопов. Использование дополнительных операций механической очистки поверхностей оптических деталей и вакуумного прогрева сборки в технологическом процессе производства лазерного датчика позволит значительно повысить его надежность, герметичность, срок хранения и эксплуатации.

Ключевые слова

оптический контакт, прочность, поверхность, стеклокерамика, ситалл

INFLUENCE OF SURFACE TREATMENT AND PURIFICATION METHODS OF CO-115M GLASS-CERAMICS ON OPTICAL CONTACT STRENGTH

N.V. Tikhmenev^{a,b}, S.A. Zakurnaev^a, A.V. Ozarenko^a, V.S. Bystritsky^a, S.A. Myagkov^a, R.A. Stolyarov^a,
K.E. Chechetov^a, S.E. Korshunov^a

^a Public Stock Company "Electropribor", Tambov, 392000, Russian Federation

^b JSC " GosNIIP ", Moscow, 129226, Russian Federation

Corresponding author: stolyarova@mail.ru

Article info

Received 06.05.16, accepted 23.05.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-613-619

Article in Russian

For citation: Tikhmenev N.V., Zakurnaev S.A., Ozarenko A.V., Bystritsky V.S., Myagkov S.A., Stolyarov R.A., Chechetov K.E., Korshunov S.E. Influence of surface treatment and purification methods of CO-115M glass-ceramics on optical contact strength. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 613–619. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-613-619

Abstract

Subject of Research. We present findings of the optical contact for details made of CO-115M glass-ceramics brand mark. The optical contact is the main method of joining parts made of CO-115M glass-ceramics brand mark in commercially available laser gyros. The existing technology has a number of unresolved issues related to the durability of the optical contact, that determine the tightness of the laser sensor internal volume. **Method.** Mechanical strength control of the optical contact consisted in the measurement of specific tear force of the connection. Mechanical strength tests of the optical contact were carried out with the use of RMI-250 tensile testing machine. The evenly increasing load of 50 N/s was applied to the samples in mechanical tests. The value with the occurrence of the optical contact destruction was registered. **Main Results.** We have shown that one of the main factors determining the mechanical strength of the joint is cleanliness of the surfaces being connected. Comparison of the influence of different surface cleaning methods for optical elements on the optical contact durability has been given. The negative impact of even short-term storage of optical parts after washing on the assembly strength has been shown. The additional operation of mechanical polishing of surfaces of stored optical parts before connection enabled significantly reducing the scatter of the optical contact mechanical strength. We have also established experimentally that the heating of assembly of optical elements under vacuum at a temperature of 300°C leads to the twofold increase in the optical contact strength, while the optical contact remains separable. **Practical Relevance.** The carried out studies make it possible to improve the technical and operational characteristics of the laser gyroes. The use of additional mechanical cleaning of surfaces of optical parts and vacuum heating of the assembly in the process of laser sensor production may significantly improve the reliability, integrity, period of storage and operation.

Keywords

optical contact, strength, surface, glass ceramics, sitall

Введение

Соединение диэлектрических деталей методом оптического контакта (ОК) известно давно [1, 2]. Были проведены исследования прочности [3], физической и химической природы [4, 5], способов соединений диэлектрических поверхностей [6, 7]. ОК широко применяется в различных классах оптических изделий [8, 9]. Также разработано похожее неразъемное соединение, известное под названием глубокого оптического контакта (ГОК), получаемое после нанесения пленки окиси кремния на соединяемые поверхности с последующим их прогревом [10]. Здесь мы не будем останавливаться на вопросах ГОК, рассмотрим только классический разъемный ОК.

Взгляд на природу ОК в настоящее время можно считать установившимся: это соединение диэлектриков через тонкую прослойку адсорбированной воды [4, 11]. Толщина водяной прослойки существенно меньше длины световой волны и составляет единицы нанометров [12]. Сведения о прочности ОК и его связи со способами подготовки поверхностей к соединению в разных источниках различаются. Следует отметить, что таких источников совсем немного. Требования к поверхностям под ОК в настоящее время сформулированы и приведены в литературе [2, 6]. Однако не всегда эти требования, в частности, требования к чистоте (отсутствию загрязнений), можно выразить объективными, измеряемыми количественно параметрами. При этом именно поверхностные микрозагрязнения, соизмеримые с толщиной водяной прослойки, в большой степени влияют на прочность оптического контакта [13]. Обнаружение таких загрязнений требует применения сложной аналитической аппаратуры, причем чаще всего нет уверенности, что в процессе контроля одних загрязнений не появятся другие. Удаление загрязнений зависит от способов очистки и подготовки поверхностей перед посадкой на ОК.

В свою очередь, повысить прочность соединения можно путем введения дополнительной термовакуумной обработки ОК. В зарубежной литературе имеются данные по исследованию влияния термовакуумной обработки ОК образцов, изготовленных из SiO₂, в широком диапазоне температур [5]. Данные отечественных авторов о прочности соединения при вакуумном прогреве ОК образцов, изготовленных из ситалла марки СО-115М, имеются лишь при температурах, не превышающих 180 °С [14].

В связи с вышеизложенным актуальными научно-техническими задачами являются:

1. определение основных факторов, влияющих на прочность ОК, которые можно выразить объективными количественными параметрами;
2. исследование прочности ОК образцов из ситалла марки СО-115М, прошедших термовакуумную обработку при температурах выше 180 °С.

Цель настоящей работы заключается в определении наиболее эффективных способов очистки и методов обработки поверхностей деталей из ситалла СО-115М, повышающих прочность ОК.

Методика и оборудование

Во всех нижеприведенных экспериментах использовался ситалл марки СО-115М. Механическую очистку поверхности ОК осуществляли с помощью полирующего порошка «Оптипол», представляющего собой смесь оксидов и оксифторидов редкоземельных элементов легкой группы (Ce, La, Nd, Pr, Sm). Да-

лее проводили химическую очистку соединяемых поверхностей с помощью стандартных химических растворов (типа хромовой смеси [14]).

Для контроля качества оптических поверхностей использовалась известная аналитическая аппаратура. Отклонение поверхностей от плоскостности проверяли интерферометром ИТ-200. Степень чистоты поверхностей контролировали с помощью темнопольного оптического микроскопа модели Axio Scope.A1, фирмы Carl Zeiss, допускающего работу в режиме фазового контраста. В особо ответственных случаях использовались эллипсометр ЛЭФ-3М для проверки наличия тонких пленок на поверхностях, а также интерферометр белого света модели NT 9080, фирмы Veeco для контроля наноразмерных дефектов и загрязнений. Исследование неоднородностей в ситалле проводили на полярископе ПКС-250.

Работа проводилась в чистых зонах класса б ИСО¹. Проведенные измерения показали, что все применяемые процессы химической обработки эффективно очищают поверхность, но в процессе длительного и повторяющегося контроля возможно появление новых загрязнений. Исходя из этого, непосредственно перед соединением контроль не проводили во избежание дополнительных загрязнений, и качество очистки оценивалось самой прочностью оптического контакта.

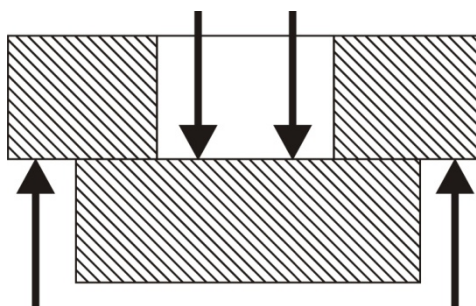


Рис. 1. Схема механических испытаний прочности оптического контакта. Стрелками показаны участки поверхностей, к которым прикладывается усилие

Для исследований использовали пары образцов, схематично показанные на рис. 1. Толщина обоих образцов составляла 12 мм, верхний образец (кольцо) имел внешний диаметр 40 мм и внутренний – 16 мм. Нижний образец (диск) имел диаметр 30 мм. Конструкция образцов выбиралась близкой к используемым на практике оптическим деталям.

Механические испытания на прочность ОК проводили с помощью разрывной испытательной машины РМИ-250. При механических испытаниях к образцам прикладывали равномерно нарастающую нагрузку 50 Н/с и фиксировали значение, при котором происходило разрушение ОК. Каждое значение прочности ОК на представленных в работе графиках является усреднением 5–10 измерений.

Для ионно-плазменной обработки (ИПО) поверхностей деталей использовали вакуумную установку. ИПО образцов проводили в среде газов кислорода и неона при давлении нескольких мм рт. ст. и мощности генератора высокочастотного электрического поля 100 Вт. Время плазменной обработки поверхности детали составило 45 мин.

Термовакuumную обработку проводили в вакуумной печи V/IG 1206-24 в диапазоне температур 100–400 °С при скорости нагрева 1 К/мин. Вакуумный прогрев образцов, соединенных методом ОК, проводили в течение 10 ч при температуре 300 °С.

Основные результаты и их обсуждение

Качество материала и время выдержки. Как известно из литературных источников, прочность оптического контакта изменяется с момента постановки оптических деталей на ОК [3, 11]. Период релаксации продолжается несколько суток и связан, по предположению авторов [6, 11, 14], с микроперемещениями в поверхностном напряженном слое. Авторы [3, 11] проводили свои исследования на плавленом кварце и стеклокерамике Zerodur со сверхмалым температурным расширением.

Изменение прочности ОК образцов, изготовленных из ситалла марки СО-115М, за период релаксации показано в табл. 1. Как видно из данных табл. 1, в течение 6 суток наблюдается сильное увеличение прочности ОК, далее ее значение практически не изменяется. Экспериментальные результаты зависимости прочности ОК от времени выдержки, полученные на ситалле марки СО-115М, совпадают с данными литературных источников [3, 11, 14].

Плавленый кварц, на котором проводилось большинство исследований [1–4, 6], – изотропный и гомогенный материал, в то время как структура Zerodur и ситалла СО-115М сильно неоднородна. Для

¹ ГОСТ ИСО 14644-1-2002 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха. ISO 14644-1-99. Cleanrooms and associated controlled environments - Part 1: Classification of air cleanliness (IDT). Введ. 01.04. 2004. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 16 с.

проверки зависимости прочности ОК от качества ситалла были выбраны образцы из материала, содержащего неоднородности в объеме материала (свилы) в виде тонких нитей или лент, обладающих показателем преломления, отличающимся от показателя преломления основной массы стеклокерамики. Вид свилей показан на рис. 2.

Время, ч	Предел прочности σ , МПа
0	$0,20 \pm 0,10$
48	$0,25 \pm 0,09$
96	$0,49 \pm 0,12$
144	$0,68 \pm 0,07$
240	$0,73 \pm 0,06$

Таблица 1. Прочность ОК от времени выдержки образцов

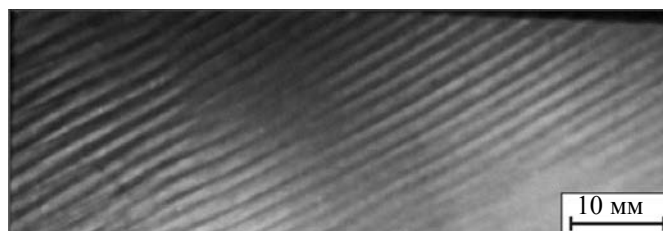


Рис. 2. Пример общего вида неоднородностей в ситалле СО-115М, видимых в поляризованном свете

Прочность на разрыв ОК между однородными и неоднородными образцами показана в табл. 2. Из табл. 2 видно, что прочность ОК зависит от качества ситалла, причем существенно влияние значительных неоднородностей, приводящих к двулучепреломлению больше 20 нм/см (рис. 2). Дальнейшая работа проводилась с образцами, изготовленными из однородного ситалла.

Качество ситалла	Предел прочности σ , МПа
Однородный	$0,76 \pm 0,35$
Неоднородный	$0,20 \pm 0,07$

Таблица 2. Влияние качества ситалла на прочность ОК

Способы очистки поверхности. Все авторы отмечают сильное влияние загрязнений на прочность ОК. Причем имеются в виду и загрязнения на микроуровне, и адсорбированные газы, и другие вещества, замыкающие на себя часть химических связей. Однако детально проследить влияние загрязнений непросто из-за трудностей их обнаружения и высокой вероятности внесения новых загрязнений на каждой операции контроля и при хранении. Вносимые загрязнения чаще всего имеют случайный характер и различную устойчивость к моющим растворам. Существуют практически не удаляемые без применения механического воздействия загрязнения [15]. В связи с этим соединения ОК лучше осуществлять как можно быстрее после завершения подготовки поверхностей. Критерием качества ОК будет являться сама прочность соединения. Поскольку качество полировки материала, отклонение поверхностей от плоскости, условия сборки одинаковы для используемых в работе образцов, то можно считать, что прочность ОК определяется степенью его чистоты.

Значения прочности ОК образцов, прошедших имитацию реального технологического цикла оптических деталей, представлены на рис. 3.

Диапазон полученных значений прочности ОК образцов достаточно велик. Причем наблюдается разброс значений прочности, несмотря на принятые меры по качественному хранению (шкафы с защитной атмосферой) и использованию специализированной тары для транспортировки оптических деталей.

Было также установлено, что непродолжительное хранение практически в любых, сколь угодно чистых атмосферных условиях (чистых зонах класса 6 ИСО), приводит к резкому уменьшению прочности ОК и далее к невозможности соединения. Ситуацию удалось изменить введением дополнительной механической очистки оптических поверхностей с помощью суспензии полировального порошка «Оптипола». Результаты эксперимента показаны на рис. 3. Видно, что механическая очистка увеличивает среднее значение прочности ОК образцов и существенно уменьшает ее разброс. Аналогичные измерения были проведены с образцами без хранения. Из рис. 3 также видно, что прочность ОК образцов без хранения и прошедших дополнительную механическую обработку практически не отличается. Поскольку предварительная подготовка деталей к установке на ОК одинакова, можно сказать, что улучшение прочности ОК после дополнительной механической очистки произошло благодаря удалению случайных загрязне-

ний. В то же время такого эффекта не удастся достичь с помощью самой жесткой химической обработки. Это показывает, что определяющую роль в повышении прочности ОК здесь играет именно механическая очистка от загрязнений.

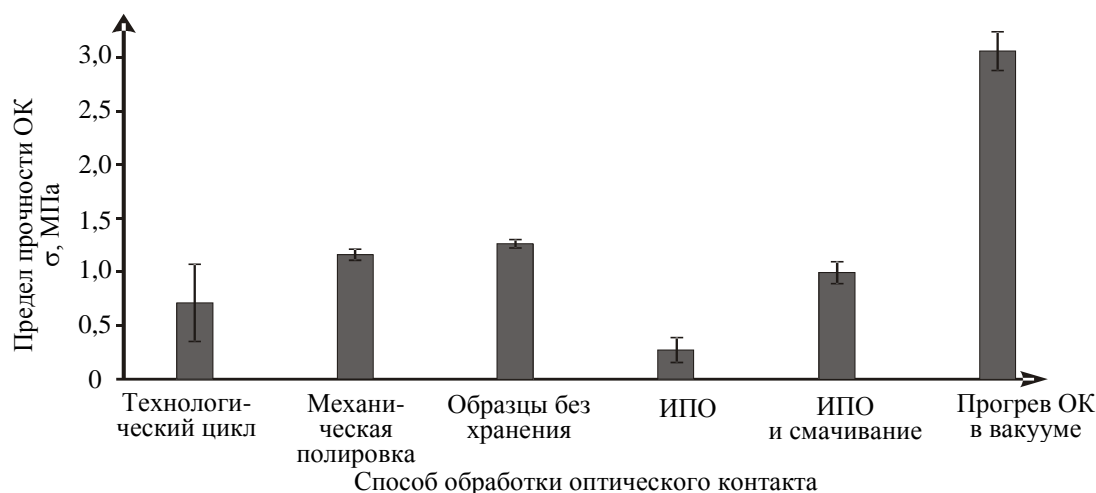


Рис. 3. Прочность оптического контакта образцов, прошедших различную подготовку

Ионно-плазменная обработка. Известно из [15], что ИПО максимально очищает от органических загрязнений и одновременно активирует оптическую поверхность детали. Первые опыты показали, что прочность ОК после ИПО сильно уменьшается, и часто вообще не удается установить соединение оптических деталей. С помощью темнопольного микроскопа и интерферометра белого света не было выявлено загрязнений и микроразрушений поверхности деталей, подвергнутых ИПО. Соединить детали не удастся, вероятно, из-за отсутствия воды на поверхности ситалла, так как ИПО эффективно удаляет адсорбированную воду. Нанесение тонкой пленки чистой деионизованной воды на соединяемые поверхности позволило увеличить прочность ОК и приблизиться к прочности образцов без хранения (рис. 3).

При создании оптического контакта важную роль играет процесс ИПО обработки, поскольку он позволяет максимально очистить соединяемые поверхности от органических загрязнений.

Термическая обработка ОК. Современные взгляды на соединения оптических деталей и теорию адсорбции воды силикатными стеклами утверждают, что ОК осуществляется через прослойку воды [4, 11, 12]. Дальнейшее упрочнение ОК возможно прогревом соединенных деталей. Известно [16], что на поверхности всех силикатных стекол (ситалл также имеет силикатную основу) в атмосферных условиях всегда присутствует адсорбированная вода. Отделение адсорбированной воды с поверхности при 100 °С невелико, оно увеличивается при подъеме температуры и достигает максимума при 170–250 °С в зависимости от типа стекла. Далее наблюдается спад (поскольку с поверхности почти все ушло), и с 400 °С начинается выделение молекул воды из объема. Соответственно, при прогреве до 200–300 °С в вакууме толщина водяной прослойки в зоне контакта должна уменьшаться, а прочность соединения – возрастать.

Увеличение прочности ОК между деталями из ситалла будет свидетельствовать об эффективности обезгаживания соединенных поверхностей при вакуумном прогреве. В [14] показано, что вакуумный прогрев при 180 °С (термовакuumная обработка по терминологии авторов работы) увеличивает прочность ОК в среднем на 25%. Таким образом, водяная прослойка почти не удаляется, и эффективного обезгаживания поверхности ситалла не происходит.

Из рис. 3 видно, что при вакуумном прогреве при 300 °С происходит увеличение прочности ОК в два раза. При разрыве образцов в некоторых случаях происходило их разрушение. Тем не менее, на разведенных поверхностях отсутствовали выколки, свидетельствующие о возникновении связей между монолитными материалами, т.е. ОК оставался разъемным. Значительное повышение прочности ОК при вакуумном прогреве на 300 °С показывает эффективное удаление водяной прослойки из зоны ОК, а значит с поверхностей оптических деталей. В то же время при вакуумном прогреве на 180 °С удаляется незначительная часть упомянутой водяной прослойки [14], следовательно, и обезгаживание поверхностей при этой температуре происходит лишь частично.

Заключение

Полученные в работе результаты хорошо согласуются с принятой в настоящее время теорией и показывают важнейшее определяющее значение чистоты соединяемых поверхностей. На прочность оптического контакта деталей из ситалла СО-115М оказывает значительное влияние однородность материала и время выдержки соединения. Введение дополнительной механической очистки оптических поверхностей с помощью суспензии полировального порошка «Оптипола» увеличивает среднее значение прочности оптического контакта образцов и существенно уменьшает ее разброс. Увеличить прочность соедине-

ния и эффективно обезгазить ситалловые поверхности оптических деталей возможно с помощью вакуумного прогрева при температуре не менее °С. Оптический контакт при термовакuumной обработке до 300 °С остается разъемным соединением.

Литература

1. Обреимов И.В., Трехов Е.С. Оптический контакт полированных стеклянных поверхностей // ЖЭТФ. 1957. № 2. С. 185–193.
2. Лисицын Ю.В. Исследование контактного соединения полированных оптических поверхностей: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1976. 193 с.
3. Качкин С.С., Листратова Г.В., Рыжакова В.А. Влияние масштабного и временного факторов на механическую прочность оптического контакта // Оптико-механическая промышленность. 1989. №3. С. 46–48.
4. Золотарев В.М., Кураева Л.Н., Качкин С.С., Лисицын Ю.В. Исследование механизма контактного взаимодействия плоских поверхностей диэлектриков // ФТТ. 1978. №1. С. 177–181.
5. Plohl A., Krauter G. Wafer direct bonding: tailoring adhesion between brittle materials // Materials Science and Engineering R: Reports. 1999. V. 25. N 1. P. 1–88. doi: 10.1016/S0927-796X(98)00017-5
6. Справочник технолога-оптика / Под ред. М.А. Окатова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
7. Азарова В.В., Акишев Ю.С., Бланк В.Д., Голяев Ю.Д., Голяева А.Ю., Грушин М.Е., Кульницкий Б.А., Петряков А.В., Сухов Е.В., Трушкин Н.И. Холодная плазма при атмосферном давлении как эффективный инструмент для упрочнения оптического контакта в лазерных гироскопах // Контенант. 2015. Т. 14. № 2. С. 64–69.
8. Guttner A., Herrmann J., Simon K.-H. Method of Making Laser Gyro Resonator Blocks. Patent US5181306. 1993.
9. Altmann G.R., Weber M.W. Method of Making a Ring Laser. Patent EP0251128. 1992.
10. Ефремов А.А., Сальников Ю.В. Изготовление и контроль оптических деталей. М.: Высшая школа, 1983. 255 с.
11. Green K., Buke J., Oreb V. Chemical bonding for precision optical assemblies // Optical Engineering. 2011. V. 50. N 2. Art. 023401. doi: 10.1117/1.3533034
12. Тощина О.К., Казаков Е.Н., Лисицын Ю.В., Путилин Э.С. Определение расстояния между контактирующими высокоточными поверхностями оптических материалов // Доклады VII Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. Ташкент, 1981. Т. 2. С. 96–98.
13. Любовина Л.А. Механическая прочность оптического контакта при испытаниях на отрыв // Оптико-механическая промышленность. 1967. №3. С. 41–43.
14. Виноградов А.Н., Запотылько Н.Р., Катков А.А., Матвеев Е.В. Проблемы оптического контакта при соединении элементов гелий – неоновых лазеров // Оптический журнал. 2014. №4. С. 61–67.
15. Черепнин Н.В. Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. М.: Советское радио, 1966. 349 с.
16. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1950. 695 с.

<i>Тихменев Николай Вадимович</i>	– кандидат физико-математических наук, технический руководитель, ПАО «Электроприбор», Тамбов, 392000, Российская Федерация; главный специалист, ОАО ГосНИИП, Москва, 129226, Российская Федерация, Nik-tikhmenev@yandex.ru
<i>Закурнаев Сергей Александрович</i>	– кандидат химических наук, заместитель главного инженера, ПАО «Электроприбор», Тамбов, 392000, Российская Федерация, zakurnaew@gmail.com
<i>Озаренко Александр Валентинович</i>	– кандидат технических наук, начальник отдела, ПАО «Электроприбор», Тамбов, 392000, Российская Федерация, uex@mail.ru
<i>Быстрицкий Владислав Сергеевич</i>	– кандидат технических наук, начальник бюро, ПАО «Электроприбор», Тамбов, 392000, Российская Федерация, Bystritsky_vs@mail.ru
<i>Мягков Сергей Анатольевич</i>	– инженер-технолог, ПАО «Электроприбор», Тамбов, 392000, Российская Федерация, myagkoww@gmail.com
<i>Столяров Роман Александрович</i>	– инженер-технолог, ПАО «Электроприбор», Тамбов, 392000, Российская Федерация, stolyarovra@mail.ru
<i>Чечетов Кирилл Евгеньевич</i>	– инженер-технолог, ПАО «Электроприбор», Тамбов, 392000, Российская Федерация, chechetovke@mail.ru
<i>Коришунов Сергей Евгеньевич</i>	– инженер, ПАО «Электроприбор», Тамбов, 392000, Российская Федерация, uex@mail.ru

- Nikolay V. Tikhmenev* – PhD, Technical supervisor, Public Stock Company "Electropribor", Tambov, 392000, Russian Federation; Chief Specialist, JSC " GosNIIP", Moscow, 129226, Russian Federation, Nik-tikhmenev@yandex.ru
- Sergey A. Zakurnaev* – PhD, Deputy Chief Engineer, Public Stock Company "Electropribor", Tambov, 392000, Russian Federation, zakurnaew@gmail.com
- Alexander V. Ozarenko* – PhD, Head of Department, Public Stock Company "Electropribor", Tambov, 392000, Russian Federation, uyex@mail.ru
- Vladislav S. Bystritsky* – PhD, Chief of Bureau, Public Stock Company "Electropribor", Tambov, 392000, Russian Federation, Bystritsky_vs@mail.ru
- Sergey A. Myagkov* – process engineer, Public Stock Company "Electropribor", Tambov, 392000, Russian Federation, myagkoww@gmail.com
- Roman A. Stolyarov* – process engineer, PSC "Electropribor", Tambov, 392000, Russian Federation, stolyarovra@mail.ru
- Kirill E. Chechetov* – process engineer, PSC "Electropribor", Tambov, 392000, Russian Federation, chechetovke@mail.ru
- Sergey E. Korshunov* – engineer, PSC "Electropribor", Tambov, 392000, Russian Federation, uyex@mail.ru