



## ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ИНКОНЕЛЬ 718, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ПАЛЛАДИЕВЫХ ПРИПОЕВ

Чл.-кор. НАН Украины **В. Ф. ХОРУНОВ**, **С. В. МАКСИМОВА**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**Ю. В. БУТЕНКО**, **А. Б. МАЛЫЙ**, инженеры (ГП НПКГ «Заря-Машпроект», г. Николаев)

Проведены сравнительные исследования прочности паяных соединений жаропрочного никелевого сплава Инконель 718, полученных с помощью высокотемпературной вакуумной пайки и припоев на базе систем Pd-Ni-Cr-Si, Pd-Ni-Co-Cr-Si, Pd-Ni-Cr-W и опытного припоя на базе системы Pd-Ni-Cr-Ge. Показана перспективность применения опытного припоя, который обеспечивает паяным соединениям заданную кратковременную и длительную прочность.

*Ключевые слова:* пайка, жаропрочный никелевый дисперсионно-твердеющий сплав Инконель 718, припой, никель, палладий, кратковременная и длительная прочность

К материалам для высокотемпературного применения относятся высоколегированные жаропрочные сплавы на основе никеля (суперсплавы), высокие механические свойства которых в основном достигаются в результате твердорастворного, интерметаллидного и карбидного упрочнений. Основной вклад вносится за счет дисперсных включений фазы на основе интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al, так называемой γ'-фазы, количество которой зависит от содержания в сплаве алюминия и титана. Сплавы с небольшим содержанием γ'-фазы свариваются хорошо, а с высоким содержанием (например, более 60 %) считаются несвариваемыми [1]. Это и определяет обычно выбор способа соединения для той или иной конструкции.

Однако на практике могут возникать ситуации, когда выбор способа соединения определяет не материал, а конструктивные особенности изделия. Подобный случай рассматривается в настоящей статье.

Изделие (центробежное колесо) представляет собой конструкцию цилиндрической формы с выфрезированными на наружной поверхности лопатками сложной геометрической формы, к верхней поверхности которых необходимо присоединить методами неразъемного соединения покрывной диск толщиной 3 мм. Материал изделия — Инконель 718 — хорошо свариваемый сплав, однако изготовить изделие дуговой или электронно-лучевой сваркой оказалось невозможным в связи с отсутствием внутри изделия доступа для сварки. Вариант сварки с лопаткой через покрывной диск путем его сквозного проплавления дугой или электронным лучом, ширина которой в райо-

не примыкания к покрывному диску составляет 2 мм, не реален. Не был одобрен также вариант нагрева электронным лучом поверхности покрывного листа для того, чтобы расплавить припой, заложенный в зазор между листом и лопаткой. В результате наиболее перспективным способом соединения была выбрана пайка.

Разработке припоев для пайки высоколегированных сплавов посвящено много работ в различных странах мира и предложены припои различных систем. Общее для них то, что это сплавы, содержащие эвтектики, поэтому для достижения высоких механических свойств необходима диффузионная выдержка при высоких температурах. Более того, большинство из этих припоев предназначены для ремонтной пайки, а не создания сложных конструкций. Желательно было иметь припой со структурой твердого раствора, который имел бы высокие прочностные характеристики при любом цикле пайки.

Известны такие припои на базе систем Mn-Ni и Ni-Pd. При пайке в вакууме, когда необходимо обеспечить высокую коррозионную стойкость соединений, более перспективна вторая система. Известен припой ПЖК-1000, который используют в промышленности для пайки узлов высокотемпературного применения. С использованием этого припоя были изготовлены образцы для испытаний на кратковременную прочность при растяжении при 20 и 550 °С и на длительную прочность. Пайка образцов проходила при температуре 1230 °С, что несколько ниже рекомендуемой (1250 °С) для этого припоя [2]. Тем не менее результаты испытаний на кратковременную прочность были достаточно высокими (таблица), а показатели длительной прочности не всегда отвечали заданному пределу. Была поставлена задача за счет корректировки



состава снизить температуру пайки, стабилизировать показатели прочности и, что тоже очень важно, повысить пластичность сплава, прокатка которого протекает с большими трудностями. Опробовано два пути: изменение легирования твердого раствора и замена элемента, образующего с палладием эвтектику. В припое ПЖК-1000 таким элементом является кремний, который не растворяется в палладию, но образует эвтектику с ним при 4 мас. % (примерно 810 °С). При этом по перитектическим реакциям образуется три интерметаллида Pd<sub>5</sub>Si, Pd<sub>9</sub>Si<sub>2</sub>, Pd<sub>3</sub>Si при температурах 810, 823 и 1045°С соответственно [3].

Легирование палладия германием вместо кремния выглядит гораздо предпочтительнее. При 775 °С растворимость германия в палладию составляет примерно 2 % и практически отсутствует при 200 °С. Таким образом, нет оснований опасаться охрупчивания при легировании германием в этих пределах, и в то же время можно ожидать упрочнения твердого раствора на основе палладия при охлаждении.

С никелем кремний образует твердый раствор (примерно до 5 %) при 700 °С, так что можно ожидать некоторое увеличение растворимости кремния при легировании палладия никелем. В то же время растворимость германия в никеле составляет примерно 12 % при 200 °С, что свидетельствует о его предпочтительности. Растворимость германия в хrome также несколько выше, чем кремния.

Следовательно, германий как легирующий элемент можно применять в сплавах системы Pd–Ni–Cr–Si в значительно больших количествах, не вызывая охрупчивания, а, значит, эти сплавы должны лучше поддаваться обработке давлением с целью получения фольг малой толщины.

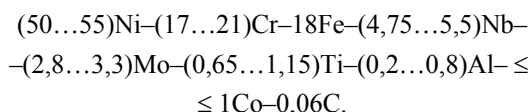
Для создания припоя со структурой твердого раствора может быть использована система Co–

Pd. На диаграмме этой системы присутствует минимум при более низкой температуре, чем в системе Ni–Pd, причем диапазон концентраций, в котором интервал плавления отсутствует, шире. При этом в интересующем нас интервале плавления какие-либо превращения не отмечены, т. е. на первый взгляд это более благоприятная диаграмма. Более того, учитывая неограниченную растворимость никеля и кобальта, можно ожидать, что может быть благоприятной и частичная замена никеля кобальтом.

Из этого следует, что интерес представляет исследование влияния возможной замены никеля кобальтом на структуру и способность к прокатке и влияние концентрации германия на те же параметры.

В настоящей работе на примере никелевого дисперсионно-твердеющего сплава Инконель 718 и припоев на базе системы Ni–Pd показана возможность получения паяных жаропрочных соединений с высоким уровнем статической кратковременной (при комнатной и повышенной температуре), а также длительной прочности (при повышенной температуре и разном значении нагрузки).

Для проведения исследований использовали сложнoleгированный жаропрочный сплав Инконель 718 (IN 718) в состоянии поставки следующего номинального состава, мас. %:



В качестве припоев для пайки сплава Инконель 718 использовали следующие материалы: промышленный припой ПЖК-1000 (система Pd–Ni–Cr–Si) (припой № 1), а также экспериментальные припои на базе систем Pd–Ni–Co–Cr–Si (№ 2), Pd–Ni–Cr–Ge (№ 3) и системы Pd–Ni–Cr–В (№ 4).

Экспериментальные припои применяли в виде прокатанных фольг толщиной около 50 мкм, стандартный припой толщиной около 100 мкм, № 4 — в виде ленты (30...50 мкм), полученной методом сверхбыстрой закалки.

Для проведения металлографических исследований и изучения механических характеристик паяных соединений изготавливали стыковые паяные соединения. Припой в виде фольги укладывали в зазор. Сборку образцов проводили с помощью контактной сварки на машине ТКМ-7 с применением стержней из никеля, которые крепили на торец образца. Пайку образцов экспериментальными припоями проводили при температурах 1220...1250 °С в течение 5...10 мин в вакуумной печи при разрежении рабочего пространства 1·10<sup>-2</sup> Па с применением радиационного нагрева. Режимы пайки отработывали на стыковых (рис. 1, а, б) и тав-

**Кратковременная прочность на растяжение паяных соединений сплава Инконель 718 при комнатной и повышенной температуре**

№ припоя	Температура пайки, °С	Время пайки, мин	Прочность на растяжение (МПа) при температуре испытаний, °С	
			20	550
1	1230	5	1275	980
1	1230	10	1310	1060
2	1230	5	1210	950
2	1230	10	1210	970
3	1230	5	1190	Не исп.
3	1230	10	1260	1030
3	1220	10	1290	1000
4	1080	90	1230	685
4	1085	120	1080	880

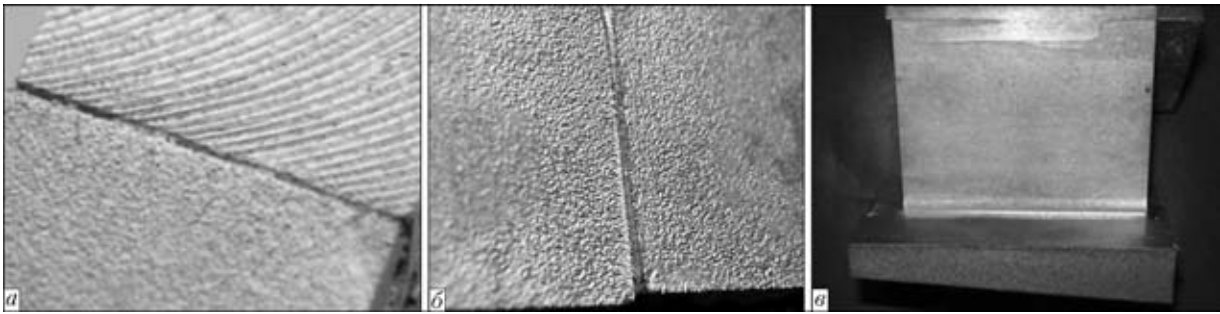


Рис. 1. Внешний вид стыковых паяных соединений, полученных соответственно при  $T_{п} = 1250, 1230 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (а, б), и таврового соединения, полученного при  $T_{п} = 1230 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (в)

ровых образцах (рис. 1, в). Из стыковых паяных соединений вытачивали стандартные образцы (по ГОСТ 1497, ГОСТ 9651, ГОСТ 10145) для механических испытаний. Время пайки при использовании припоя № 4 увеличивали до 90 и 120 мин для обеспечения диффузии бора из шва в основной металл и уменьшения количества боридов в паяном шве.

После пайки перед механическими испытаниями образцы подвергали термической обработке, которая приводит к упрочнению сплава Инконель 718 в результате выделения упрочняющих фаз. Режим термообработки следующий: закалка при  $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдержка 1,5 ч, охлаждение на воздухе, старение при  $760 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдержка 10,5 ч, охлаждение с печью до  $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $55 \text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ , выдержка при этой температуре 8,5 ч, охлаждение на воздухе. В упрочненном состоянии временное

сопротивление разрыву при комнатной температуре сплава Инконель 718 составляет  $1338 \text{ МПа}$ , при  $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$  —  $965 \text{ МПа}$ . Для проведения кратковременных испытаний на растяжение при комнатной температуре использовали разрывную машину ИМЧ-30, для кратковременных испытаний при температуре  $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$  — ИМ 12А. Длительные испытания проводили с помощью машины МП-3. При длительных испытаниях образцы нагревали до  $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдерживали 2 ч, затем прилагали требуемую нагрузку.

Проведенные исследования паяных стыковых и тавровых образцов показали, что при температуре  $1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$  припой № 1–3 имеют высокую жидкотекучесть и хорошо растекаются по подложке из сплава Инконель 718. Отмечено вытекание припоя из паяного зазора и растекание его по поверхности паяемого материала. При данной тем-

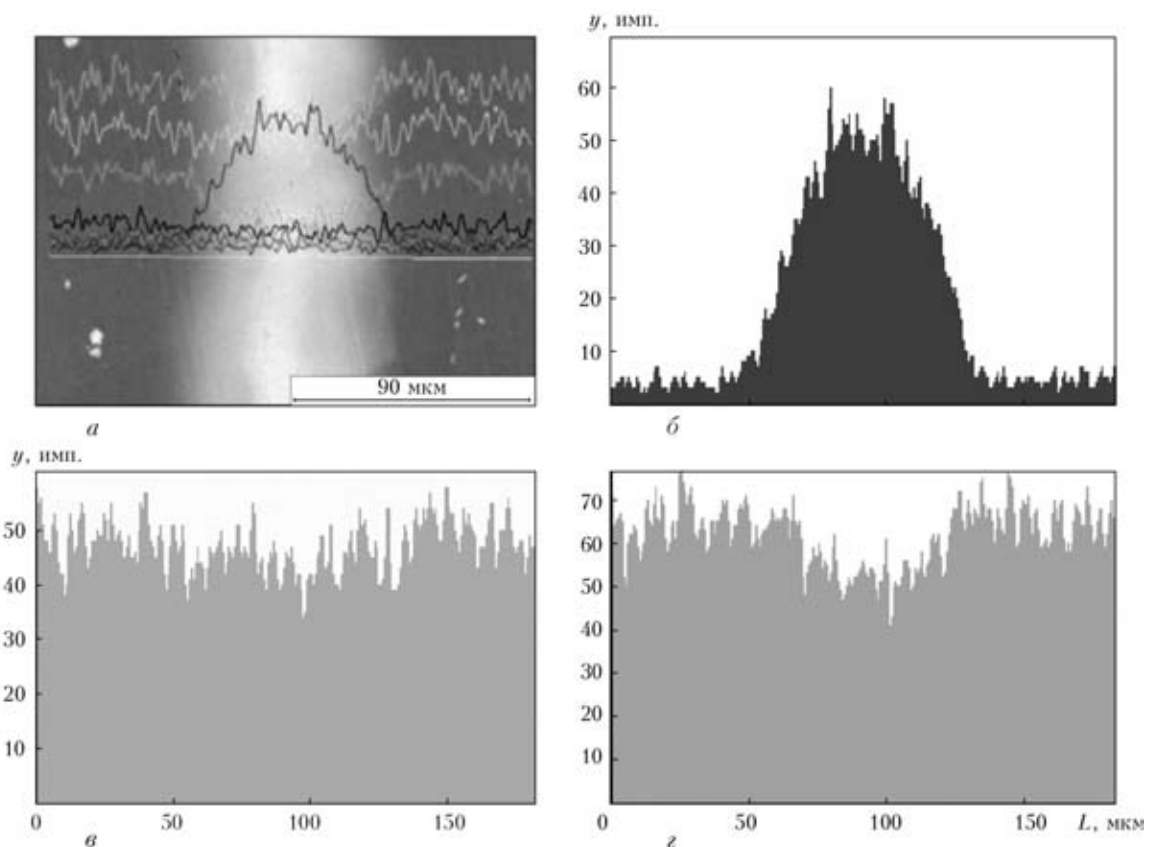


Рис. 2. Микроструктура паяного шва (а) и распределение палладия (б), никеля (в), хрома (г) в нем

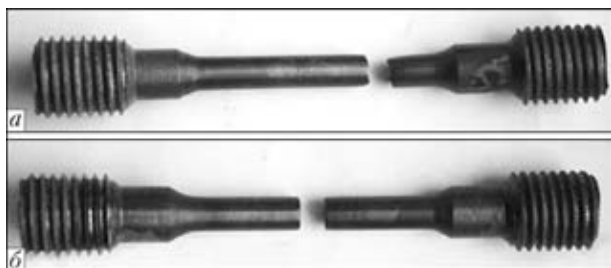


Рис. 3. Разрушение паяных образцов после испытаний на длительную прочность: *a* — основной металл; *б* — металл паяного шва

пературе галтели не образовывались, визуально наблюдалась рыхлость паяных швов (см. рис. 1, *a*).

Режимы пайки отработывали на стыковых и тавровых образцах. Снижение температуры пайки при изготовлении стыковых соединений с помощью припоев № 1, 2 до 1230 °С, припоя № 3 до 1210...1230 °С способствовало формированию галтелей минимальных размеров, эрозия основного металла отсутствовала (см. рис. 1, *б*). При пайке тавровых соединений наблюдалось хорошее формирование тонких плотных галтельных участков (см. рис. 1, *в*).

Структура паяных швов однородная (рис. 2, *a*), никель равномерно распределяется в основном металле и в паяном шве (рис. 2, *в*), количество палладия плавно увеличивается по ширине паяного шва от основного металла к центральной части шва (рис. 2, *б*), количество хрома несколько больше в основном металле (рис. 2, *з*).

Результаты кратковременных испытаний паяных соединений на растяжение при комнатной температуре показали, что все исследуемые припои обеспечили высокую прочность паяным соединениям (от 1080 до 1310 МПа, таблица). Разрушение паяных соединений происходило по основному металлу. Максимальные средние значения прочности на растяжение (1292,5 МПа) получены при использовании припоя № 1. При увеличении времени пайки на 5 мин происходит повышение средней прочности на растяжение при использовании припоев № 1 и 3 соответственно на 2,7 и 4,7 % и для припоя № 3 составляет 1290 МПа. Припой № 2 обеспечил довольно стабильные результаты прочности, но на более низком уровне (1210 МПа), независимо от времени пайки.

Легирование припоя системы Pd-Ni-Cr-Si кобальтом улучшает пластичность паяных соединений примерно в два раза, о чем свидетельствуют значения относительных удлинений (15,2...16 %) и сужений (18...19,7 %). Высокие значения пластичности, соответственно относительного сужения (22,5 %) и удлинения (10 %) получены при использовании опытного припоя № 3.

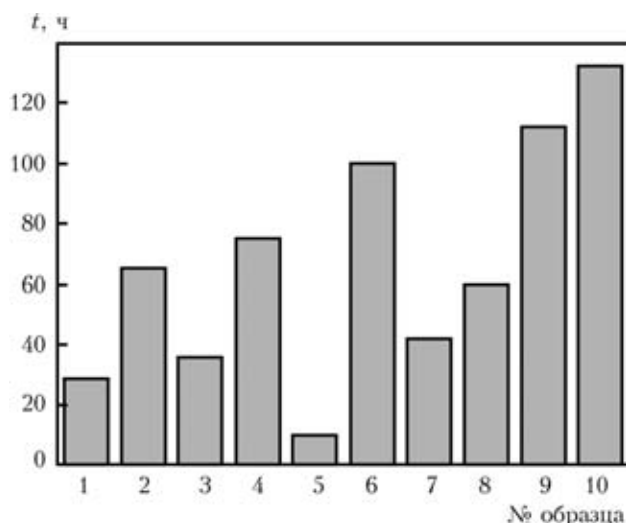


Рис. 4. Длительная прочность паяных соединений, полученных с использованием промышленного припоя Pd-Ni-Cr-Si (образцы 1, 2) и опытных припоев Pd-Ni-Co-Cr-Si (3, 4), Pd-Ni-Cr-B (5, 6), Pd-Ni-Cr-Ge (7-10)

Тенденция распределения прочностных свойств между применяемыми припоями практически сохранилась при высокотемпературных испытаниях, которые проводили при температуре 550 °С (таблица). Средняя прочность на разрыв при пайке припоями № 1 и 3 примерно одинаковая, соответственно 1020 и 1015 МПа. Более низкие средние значения получены при использовании припоев № 2 (960 МПа) и № 4 (783 МПа). Минимальные значения прочности соединений, полученных с помощью припоя системы Pd-Ni-Cr-B, обусловлены наличием бора, который характеризуется малой растворимостью в никеле. Во время изотермической пайки он диффундирует из шва в паяемый металл и выделяется по границам зерен основного металла в виде боридов, что отрицательно влияет на прочностные свойства.

Максимальную пластичность при температуре 550 °С обеспечивает припой, легированный кобальтом, относительное удлинение паяных образцов, полученных при его использовании, находится в пределах 10...80 %. Пластичность паяных соединений, полученных с помощью опытного припоя, несколько ниже и составляет 4...12 %.

При испытаниях на длительную прочность при температуре 550 °С и напряжении 785 МПа образцы разрушались по основному металлу при пайке припоями № 1 после 29 ч и № 2 после 75 ч (рис. 3, *a*), а также по металлу шва, паяного припоями № 2-4 (рис. 3, *б*).

Лучшие результаты показали паяные соединения, полученные с помощью опытного припоя № 3 (рис. 4). Из четырех образцов два разрушились после 42, 60 ч испытаний. Образцы № 9 и 10 не разрушились соответственно после 112 и 130 ч (рис. 4), что превысило требуемый рабочий ресурс более чем в два раза.



С использованием припоя № 3 были изготовлены тавровые образцы, которые успешно прошли испытания при нагрузке 220 и 300 МПа, условный предел выносливости соответственно составлял  $6,2 \cdot 10^6$  и  $8,7 \cdot 10^6$  циклов.

**Выводы**

1. Проведенные исследования паяных соединений жаропрочного никелевого сплава Инконель 718 показали, что применение борсодержащего припоя Pd–Ni–Cr–B не позволяет получить требуемую прочность и пластичность паяных соединений как при комнатной, так и при повышенной температуре.

2. Установлено, что при определении кратковременной прочности на растяжение при комнатной температуре увеличение времени пайки (с 5 до 10 мин) приводит к повышению средней прочности на растяжение при использовании промышленного (№ 1) и опытного (№ 3) припоев соответственно на 2,7 и 4,7 %.

3. Определено, что максимальную кратковременную прочность на растяжение 1310 МПа (при

$T_{исп} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) получили при пайке жаропрочного сплава Инконель 718 промышленным припоем на базе системы Pd–Ni–Cr–Si. Однако при испытаниях на длительную прочность паяные соединения имели недостаточный рабочий ресурс в интервале 29...60 ч.

4. Опытный припой Pd–Ni–Cr–Ge обеспечивает кратковременную прочность на разрыв на уровне основного металла 1230...1290 МПа и показывает стабильные результаты при испытаниях на длительную прочность при температуре 550 °С и нагрузке 785 МПа. Паяные образцы не разрушались даже после 112 и 132 ч испытаний, что превысило требуемый ресурс более, чем вдвое.

1. Симс Ч., Хагел В. Жаропрочные сплавы / Пер. с англ. — М.: Metallurgy, 1976. — 568 с.
2. Справочник по пайке / Под ред. И. Е. Петрунина. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2003. — 480 с.
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. В 3 т.: Т.3 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. — М.: Машиностроение, 1999. — 880 с.

Comparative strength studies were performed on high-strength Inconel 718 nickel alloy brazed joints, made using vacuum brazing and brazing filler metals based on Pd–Ni–Cr–Si, Pd–Ni–Co–Cr–Si, Pd–Ni–Co–Cr–Si, Pd–Ni–Cr–B systems and test filler metal based on Pd–Ni–Cr–Ge system. Good prospects for application of the test filler metal, which ensures the specified short- and long-term strength of brazed joints, are shown.

Поступила в редакцию 29.04.2010

# ПЕТЕРБУРГСКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ЯРМАРКА

15–17 марта 2011, Санкт-Петербург

- ▲ ВЫСТАВОЧНЫЕ ЭКСПОЗИЦИИ
- ▲ ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОНГРЕСС
- ▲ БИРЖА ДЕЛОВЫХ КОНТАКТОВ
- ▲ КОНКУРСНАЯ ПРОГРАММА

**Специализированные выставки:**

- Metallurgy. Литейное дело • Машиностроение
- Обработка металлов • Современное промышленное предприятие • Автопром / ИСТА • Высокие технологии. Инновации. Инвестиции (Hi-Tech)

**Специальные экспозиции:**

- Коллективная экспозиция «Санкт-Петербург – регионы России» • Экспозиция субъектов малого предпринимательства Санкт-Петербурга

**Совместно с Петербургской технической ярмаркой пройдут:**

- II Международная специализированная выставка BLECH Russia
- V Петербургский Партнериат

20 лет  
РЕСТЭК

Тел./факс: (812) 320-9676, 320-8092

E-mail: autopr@restec.ru

www.ptfair.ru