

УДК 621.791.16

DOI 10.18698/0536-1044-2018-2-50-57

Ультразвуковая сварка рабочих колес центробежных насосов из капролона В

С.С. Волков, В.М. Неровный, И.В. Станкевич

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Ultrasonic Welding of Caprolon B Centrifugal Pump Impellers

S.S. Volkov, V.M. Nerovnyy, I.V. Stankevich

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: map@bmstu.ru, vmn@bmstu.ru, aplmex@yandex.ru



На основании исследования физико-механических характеристик термопластичного полимерного материала — капролона В — обоснован выбор способа ультразвуковой сварки для изготовления рабочих колес. Проведен анализ существующих способов изготовления рабочих колес центробежных насосов. Исследования физико-механических свойств капролона В при различных условиях эксплуатации выявили возможность его применения для производства рабочих колес центробежных насосов. Сварное соединение может быть получено путем смещения высокотемпературной области к границе раздела, что реализуется V-образной разделкой кромок. Применение V-образной разделки свариваемых кромок приводит к преимущественному теплообразованию на границе раздела, обусловленному повышением уровня динамических напряжений, и обеспечивает получение качественного сварного соединения. Приведены результаты механических и эксплуатационных испытаний рабочих колес, выполненных ультразвуковой сваркой. Предложен и исследован способ изготовления рабочих колес с использованием заклепочных соединений, выполняемых ультразвуковой сваркой. Эксплуатационные испытания показали, что рабочие колеса центробежных насосов, изготовленные таким способом, удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. Акустические параметры (амплитуда, частота) в исследуемом диапазоне не влияют на прочность соединения, но оказывают значительное влияние на повышение производительности процесса. Рост статического сварочного давления также способствует увеличению производительности благодаря уменьшению времени разогрева свариваемой заклепки и, как следствие, всего изделия.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, заклепочное соединение, рабочее колесо центробежного насоса, амплитуда колебаний волновода, циклическое деформирование, статическое сварочное давление



Based on the research of physico-mechanical characteristics of caprolon B, a thermoplastic polymeric material, a justification of the choice of the ultrasonic welding method for the production of centrifugal pump impellers is presented. An analysis of the existing methods of manufacturing centrifugal pump impellers is performed. The research of physico-mechanical properties of caprolon B under various operating conditions established the possibility of using it to manufacture centrifugal pump impellers. A weld joint can be obtained by shifting the high-temperature area to the interface realized through the V-shaped edge preparation. The application of the V-shaped preparation of welded edges leads to the primary heat generation at the interface caused by an increase in the level of dynamic stress-

es, and produces a high-quality welded joint. The results of mechanical and operational tests of the impellers manufactured using ultrasonic welding are given. A method of manufacturing impellers using rivet joints made by ultrasonic welding is proposed and investigated. The operational tests have shown that the centrifugal pump impellers produced using the proposed method meet the specified requirements. Acoustic parameters (amplitude, frequency) in the investigated range do not influence the joint strength but have an impact on increasing the process productivity. The increase in the welding static pressure also contributes to increased productivity due to the reduction in time required to warm up the welded rivet and, as a result, the whole product.

Keywords: ultrasonic welding, rivet joint, centrifugal pump impeller, oscillation amplitude of the waveguide, cyclic deformation, static welding pressure

Интенсивное использование пластмасс в различных отраслях экономики требует создания высокопрочных полимерных материалов (ПМ). Капролон — новый конструкционный материал, обладающий высокими прочностными характеристиками. Комплекс физико-механических свойств капролона позволяет надеяться, что он найдет исключительно широкое применение в судостроении. Капролон — термопластичный материал из группы полиамидов, представляющий собой продукт низкотемпературной полимеризации капролактама в присутствии щелочных катализаторов и активаторов. Такой ПМ, выпускаемый в виде блоков и заготовок, используют как конструкционный и антифрикционный материал для изготовления крупногабаритных и мелких изделий [1].

Капролон устойчив к воздействию углеводородов, масел, спиртов, кетонов, эфиров, щелочей и слабых кислот. Однако широкому распространению этого полимера в промышленности препятствует отсутствие технологического способа соединения изделий, выполненных из него [1, 2]. Детали из капролона, изготавливаемые как цельнолитыми, так и из отдельных частей, соединяют механическим способом (болтами, заклепками и др.), склеиванием и сваркой [3].

Сварка представляет собой интерес, так как дает возможность снизить трудоемкость, повысить качество изделий и культуру производства. Кроме того, в некоторых случаях сварка является единственным способом, позволяющим получить соединение, удовлетворяющее условиям эксплуатации изделия [3, 4].

По теплофизическим свойствам капролон относится к трудносвариваемым термопластам. Процесс сварки такого материала затруднен тем, что при его нагревании на воздухе происходит окислительная деструкция. Окисление же капролона сопровождается резким ухудшением его физико-химических свойств [1]. По-

этому для соединения деталей из капролона необходимо выбирать такой способ сварки, который бы удовлетворял этим требованиям.

С учетом изложенного на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся исследования в целях определения возможности получения сварного соединения с помощью ультразвуковой сварки (УЗС) рабочих колес (РК) крупногабаритных центробежных насосов из капролона В, применяемых в судостроительной промышленности [3, 5].

Цель работы — разработка и исследование УЗС РК центробежных насосов из капролона В с помощью заклепок, а также определение их оптимальной механической прочности на разрыв.

В настоящее время замена металлических деталей центробежных насосов полимерными является весьма актуальной проблемой судостроения. РК центробежных насосов обычно изготавливают из металлов и сплавов путем отливки по выплавляемым моделям. К недостаткам этого способа следует отнести большую массу изделия, сложность технологического процесса производства, трудность обработки внутренних полостей РК после отливки, высокую стоимость и неблагоприятные санитарно-гигиенические условия применяемой технологии.

В основу работы РК центробежного насоса положен следующий принцип. Двигатель вращает вал, на котором укреплено РК, снабженное рабочими лопатками. Перекачиваемая среда (соленая или пресная вода) всасывается через входной патрубок (рис. 1) и поступает в межлопаточное пространство, где при захвате рабочими лопатками приобретает большую кинетическую энергию. При выходе из РК скорость среды уменьшается, и вследствие торможения ее кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию давления. Среда высокого давления отводится через выходной патрубок.

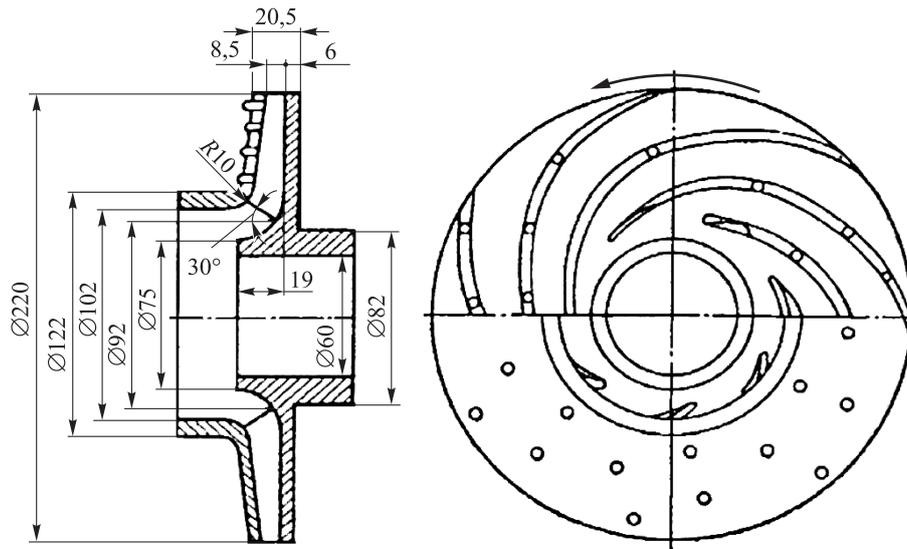


Рис. 1. РК центробежного насоса

Исследование эксплуатационных свойств капролона В, проведенное в работах [6, 7], выявило, что этот ПМ, получивший большое распространение в судостроительной промышленности благодаря высоким прочностным свойствам, можно использовать в качестве конструкционного материала для изготовления РК центробежных насосов. Так, в результате экспериментов по определению влияния водопоглощения на прочностные характеристики капролона В установлено, что его физико-механические показатели после длительного пребывания в воде изменяются незначительно, оставаясь в 2 раза выше, чем у капрона [7].

Анализ способов производства подобных изделий из ПМ показал, что РК можно изготавливать двумя методами — отливкой целого колеса с использованием соляных знаков и соединением двух его частей (опорного и покрывающего дисков), отлитых отдельно друг от друга в прессформах с помощью горячего лезвия [2, 3].

Однако применение этих способов ограничено неспособностью к полимеризации некоторых материалов (например, капролона В) в присутствии соляных знаков, а также из-за значительных отклонений геометрических размеров и низкой чистоты рабочей полости изделия, так как грат, образующийся при такой сварке, будет выдавливаться на стенки лопастей и внутреннюю поверхность опорного диска, а его удаление связано со значительными трудностями.

Кроме того, известно [1, 2], что капролон В имеет склонность к термоокислительной деструкции, поэтому есть все основания предполагать, что за время, необходимое для отвода

инструмента-нагревателя, окисление уже произойдет. Это может сказаться на прочностных характеристиках соединений.

Таким образом, в настоящее время отсутствует способ, применение которого дало бы возможность получать РК из ПМ в соответствии с представленными требованиями. Поэтому, исходя из соображений производительности процесса, предохранения материала от термоокислительной деструкции и исключения возможности протекания грата в рабочую полость, рассмотрим УЗС РК из капролона В [2, 6].

На свариваемость ультразвуком влияет большое количество факторов. К ним в первую очередь относятся гистерезисные потери при циклическом деформировании, динамический модуль упругости, температурный интервал вязкотекучего состояния и демпфирующие свойства. Поэтому необходимо определить значения этих параметров применительно к капролону В.

Как отмечено в работах [3, 5], гистерезисные потери от циклического деформирования являются источником теплоты при УЗС, обуславливая тем самым возможность получения соединений. Большинство пластмасс имеет сравнительно высокие гистерезисные потери. Это приводит к их значительному разогреву, что, в свою очередь, гарантирует теплообразование при УЗС [1, 8].

Для создания прочных соединений свариваемые поверхности следует разогреть до определенной температуры, которая должна быть ниже температуры деструкции и выше минимальной, что соответствует температурному интервалу вязкотекучего состояния [6, 9].

При исследовании применяли РК, изготовленные из конструкционного ПМ капролона В, получившего широкое распространение благодаря высоким прочностным свойствам и ограниченному водопоглощению [1]. РК центробежного насоса состоит из опорного и покрывающего дисков диаметром 220 мм. На опорном диске литьем спиралеобразно сформированы семь лопаток толщиной 5,5 мм, изменяющихся по высоте. Развернутая длина каждой лопатки — около 200 мм. Предполагалось, что соединение должно быть образовано по всей поверхности прилегания лопаток опорного диска к покрывающему.

В работе [2] показано, что тавровые или стыковые соединения капролона В могут быть получены при условии применения V-образной разделки кромок. Поэтому была изготовлена партия колес с соответствующей разделкой свариваемых лопастей (рис. 2, а).

Опытная УЗС колес проводилась ножевыми волноводами с длиной рабочей поверхности до 60 мм. Ввод ультразвуковых колебаний осуществлялся со стороны как опорного, так и покрывающего дисков. Было замечено, что при пропускании колебаний с частотой 22 кГц через покрывающий диск и лопатки происходит локальное оплавление разделки свариваемых кромок с последующим образованием местных очагов схватывания. Причем изменение места подвода ультразвуковых колебаний не оказывало существенного влияния на теплообразование.

Работоспособное сварное соединение получено при условии одновременного ввода энергии по всему периметру прилегания лопаток, так как только в этом случае можно осуще-

ствить одновременную осадку соединяемых поверхностей (см. рис. 2, а). Реализация этого положения требует создания широкозахватной акустической системы с площадью контакта около 120 см², что весьма затруднительно.

Кроме того, при УЗС наблюдается интенсивное гратообразование. Последующее удаление грата с рабочей поверхности РК центробежного насоса также связано с определенными трудностями. Поэтому в целях достижения качественных и прочностных характеристик весьма рациональным представляется соединить опорный и покрывающий диски с помощью заклепок в виде штырей, размещенных на поверхности лопаток и при сборке входящих в соответствующие отверстия на покрывающем диске (рис. 2, б). Соединение в этом случае осуществляется путем оплавления штыря и заполнения осажженным материалом раззенкованного в покрывающем диске объема.

При такой схеме сварки обеспечивается контактный ввод энергии, что позволяет получать соединения даже на материалах с большим коэффициентом затухания. Высоту (11,5 мм) цилиндрических заклепок диаметром 4,7 мм выбирали из условия заполнения объема зенковки. Сварку выполняли по «фиксированной осадке», значение которой составляло 5,5 мм.

Все исследования по свариваемости РК проводили на ультразвуковой сварочной установке УЗП-1, разработанной на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана с использованием магнитострикционного преобразователя ПМС-1,5 мощностью 1,5 кВт и резонансной частотой 22 кГц. Сварку осуществляли ножевыми и точечными экспонен-

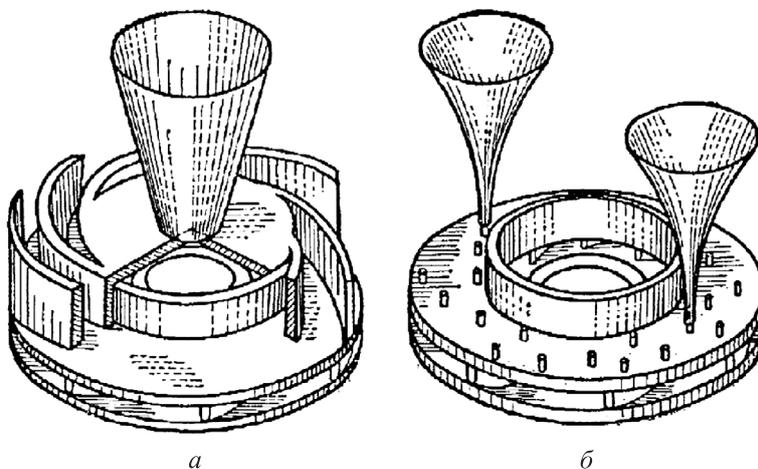


Рис. 2. Схемы сварки РК центробежного насоса:
а — контурным волноводом; б — заклепками

циальными волноводами, рассчитанными на эту частоту и обеспечивающими необходимую амплитуду колебаний волновода, контролируемые измерительными датчиками, встроенными в ультразвуковой генератор ИЛ10-1,5. Статическое сварочное давление, создаваемое с помощью пневмосистемы, регистрировали образцовым манометром.

Механизм образования сварного заклепочного соединения условно подразделяется на две стадии. На первой происходит разогрев полимерного стержня — заклепки — до температур сварки, обусловленный конкуренцией гистерезисных потерь от циклического деформирования и теплоотвода в окружающую среду. Последним фактором, вероятно, можно пренебречь, поскольку капролон В имеет небольшой коэффициент теплопроводности, вследствие чего понижение прочности сварного соединения за счет термического влияния должно быть незначительным. В связи с этим предполагалось, что акустические параметры системы не оказывают существенного влияния на прочность соединения, и их значения выбирались из условия обеспечения наибольшей производительности процесса.

Так как разогрев стержня заклепки обусловлен только энергией гистерезисных потерь, которая пропорциональна квадратам амплитуды колебаний волновода и частоты, число сочетаний амплитуд и частот, приводящих ПМ к разогреву до необходимой температуры, может быть большим. Поэтому из соображений повышения производительности процесса амплитуду колебаний волновода варьировали в пределах наибольших значений (30...40 мкм), рекомендуемых для сварки ПМ. Частоту ультразвуковых колебаний поддерживали постоянной и равной 22 кГц.

Несомненно, что на процесс образования соединения значительное влияние оказывает статическое сварочное давление. Считается, что оно необходимо для создания акустического контакта между волноводом и изделием. Показано, что повышение статического сварочного давления вызывает линейное падение температуры стеклования полимеров. Можно предположить, что это явление имеет место и при УЗС, приводя к снижению времени разогрева. Причем этот процесс будет усиливаться вследствие увеличения затухания механической энергии, связанного с уменьшением динамического модуля упругости, свариваемого матери-

ала из-за предварительного напряженного состояния последнего. Исходя из изложенного, статическое сварочное давление варьировали в пределах 4,1...8,5 МПа.

На второй стадии образования сварного заклепочного соединения ПМ осаживается, заполняя раззенкованный объем. Для этой стадии характерны процессы термовиброползучести, уплотнения материала в заполненном объеме и диффузии. Установлено, что объем зенковки влияет на прочность соединения, поэтому его изменяли в пределах 75...125 мм³.

Немаловажным вопросом при изготовлении изделий с помощью заклепочных соединений является выбор числа заклепок с учетом разброса прочностных показателей. Суммарная прочность заклепок при приложении внешней нагрузки не будет равна произведению среднего значения прочности одной заклепки на их число, так как всегда имеется разброс по прочности, определяемый величиной S_T . Для нахождения максимального значения внешней нагрузки Q_{max} , которое может быть приложено к группе заклепок, используем подход, изложенный в работе [10].

Пусть соединение осуществляется с помощью n заклепок, прочность которых изменяется от q_{min} до q_{max} . Это означает, что существует некоторая функция распределения $n(q)$. Общее число заклепок определяется как

$$n = \int_{q_{min}}^{q_{max}} n(q) dq,$$

где d_q — диаметр заклепки.

Предположим, что при приложении к изделию растягивающей нагрузки в каждой заклепке возникают одинаковые напряжения P . Вследствие этого произойдет разрушение части заклепок, прочность q которых будет меньше, чем P . Внешняя нагрузка перераспределится на оставшиеся неразрушенные заклепки, и наступит квазистационарное состояние. Для дальнейшего разрушения заклепок необходимо увеличивать внешнюю нагрузку.

Следовательно, равновесному состоянию будет соответствовать условие

$$P_i = \frac{Q_{max}}{\int_{q_i}^{q_{max}} n(q) dq} \leq q_i,$$

где знаменатель определяет количество заклепок, прочность которых больше, чем q_i .

Если распределение прочности одиночных заклепок подчиняется нормальному закону, то

$$n(q) = \frac{n}{S_{\bar{Y}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(q - \bar{q})^2}{2S_{\bar{Y}}^2} \right], \quad (1)$$

где \bar{q} — среднее арифметическое значение прочности одной заклепки.

Поскольку прочность заклепки не может быть отрицательной или бесконечно большой величиной, это распределение следует рассматривать как ограниченное в пределах

$$\bar{q} - \alpha S_{\bar{Y}} \leq q_i \leq \bar{q} + \alpha S_{\bar{Y}}, \quad (2)$$

где α — коэффициент, характеризующий границы распределения; $\bar{q} - \alpha S_{\bar{Y}} = q_{\min}$; $\bar{q} + \alpha S_{\bar{Y}} = q_{\max}$.

Так как $q_{\min} = \bar{q} - \alpha S_{\bar{Y}} = 0$ (т. е. предполагается, что могут иметься заклепки с трещинами или по каким-либо причинам сварка не произошла), коэффициент, характеризующий границы распределения, имеет вид

$$\alpha = \frac{\bar{q}}{S_{\bar{Y}}}. \quad (3)$$

Тогда из условия (1) с учетом соотношений (2) и (3) получим выражение для внешней нагрузки

$$Q = nq_i \frac{1}{S_{\bar{Y}} \sqrt{2\pi}} \int_{q_i}^{2\bar{q}} e^{-\frac{(q - \bar{q})^2}{2S_{\bar{Y}}^2}} dq. \quad (4)$$

Введя обозначение $q_i - \bar{q} = \pm x S_{\bar{Y}}$, можно показать, что выражение (4) сводится к следующему соотношению:

$$Q = nS_{\bar{Y}} \left(\frac{1}{V} - x \right) \left[0,5 + \frac{1}{2} \Phi(x) \right], \quad (5)$$

где V — коэффициент вариации; $\Phi(x)$ — функция Лапласа при $x = (q_i - \bar{q})/S_{\bar{Y}}$.

По формуле (5) легко найти максимальное значение внешней нагрузки Q_{\max} графически. Прделав необходимые для этого расчеты и построения, получим, что безразмерная величина $Q'_{\max} = Q_{\max}/(nS_{\bar{Y}})$ линейно зависит от $1/V$:

$$Q'_{\max} = 0,866 \left(\frac{1}{V} - 1 \right).$$

Тогда

$$Q_{\max} = 0,866 (\bar{q} - S_{\bar{Y}}) n. \quad (6)$$

Для проверки выражения (6) проведена сварка изделия, скрепленного двадцатью заклепками. При режимах, указанных ранее, статические

характеристики одной заклепки имели следующие значения: $\bar{q} = 10$ МПа, $S_{\bar{Y}} = 8,3$ МПа. Разрушающая нагрузка, определенная при испытаниях, составила 150 МПа, а рассчитанная по формуле (6) — 160 МПа. Таким образом, погрешность расчета лишь немного превысила 6 %.

Первоначальное количество заклепок на каждой лопатке выбирали из условия обеспечения нагрузки, равной 100 МПа. Последующие стендовые испытания проводили для РК, снабженных четырьмя заклепками, распределенными равномерно по длине лопатки. Это позволило повысить разрывную нагрузку до 150 МПа. При этом сварку колеса выполняли двумя волноводами, каждый из которых обрабатывал две точки, что впоследствии было использовано в конструкции ультразвуковой сварочной установки для изготовления РК.

После сварки проводили предусмотренное заводской технологией снятие поверхности покрывающего диска на 1 мм для удаления наплывов, возникающих после осадки заклепки. Для выяснения влияния снятия поверхностного слоя на прочность соединения выполнен эксперимент, результаты которого приведены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, снятие поверхностного слоя на 1 мм приводит к повышению прочности детали. Это, по-видимому, связано с удалением различных дефектов (микротрещин, несплошностей), возникающих при контакте расплавленного полимера с холодным волноводом.

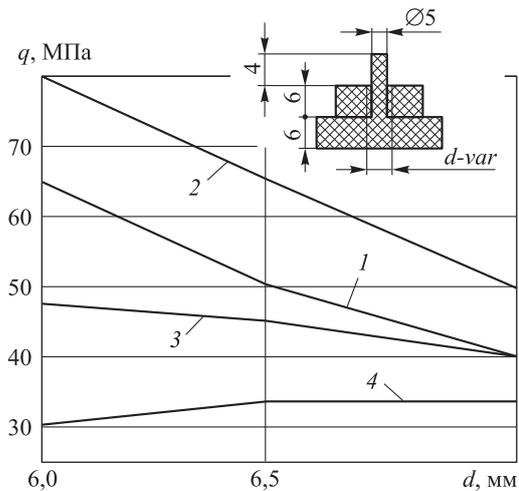


Рис. 3. Влияние снятия поверхности на прочность q заклепочных соединений:
1 — поверхность не снята; 2 — снят 1 мм;
3 — снято 2 мм; 4 — снято 3 мм

Исследование заклепочных сварных РК центробежных насосов выполняли двумя методами — на разрыв и в специальных стендах, имитирующих рабочие условия.

В первом случае испытывали три колеса с двадцатью заклепками, прикладывая нагрузку по оси РК. Разрывное усилие составляло 160, 150 и 140 МПа, что вполне удовлетворяет техническим требованиям и хорошо согласуется с теоретическим значением, рассчитанным по приведенной выше формуле.

Второй вид испытаний, проведенных на шести колесах, заключался в оценке их работоспособности на стендовых насосах при следующих рабочих параметрах: реагент — питательная вода; напор воды — 2,8 МПа; подача — 30 м³/ч; температура реагента — 20...60 °С; мощность электродвигателя — 10 кВт; число оборотов — 3 000 об/мин. Сварные колеса успешно выдержали и эти испытания, отработав необходимый моторесурс.

На основании результатов исследования выявлены следующие преимущества предлагаемого колеса перед другими РК: оно обладает достаточной механической прочностью, которую можно изменять, варьируя число или размеры заклепок; плотность прилегания лопаток опорного диска к покрывающему находится в пределах допуска; отклонение геометрических размеров вследствие локального тепловыделения незначительно; гратообразование в рабочей полости при правильно сформированной разделке полностью отсутствует.

Помимо этого способа, можно соединить опорный и покрывающий диски с помощью автономно изготовленных штырей, которые входят в отверстия на покрывающем диске и опираются непосредственно на лопатку. Штырь в этом случае имеет конусное основание в той части, которая соприкасается с лопаткой. При этом сначала сваривают конусную часть стерж-

ня с лопаткой, а затем начинается оплавление основной части автономного штыря с заполнением раззенкованного объема и получением неразъемного соединения. Однако следует отметить, что при таком методе прочностные характеристики изделий на 15...25 % ниже, чем в первом случае. Это связано с более низкими прочностными показателями сварного соединения по сравнению с основным материалом. Данный метод может найти применение при подварке изделий в тех местах, где не произошло образования штыря после отливки.

Выводы

1. Предложен новый способ изготовления РК из капролона В с использованием заклепочных соединений, выполняемых УЗС.

2. Эксплуатационные испытания показали, что РК центробежных насосов, изготовленные предложенным способом, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к таким изделиям.

3. Исследования физико-механических характеристик капролона В при водопоглощении, старении, повышенных температурах и усталостных испытаниях установили возможность его применения для изготовления рабочих колес.

4. Показано, что оптимальными с точки зрения механической прочности на разрыв являются следующие значения параметров УЗС заклепочных соединений из капролона В: амплитуда колебаний волновода 30...40 мкм, статическое сварочное давление 8,5 МПа, объем зенковки 75...125 мм³.

5. Представлено аналитическое выражение, связывающее прочность заклепочного соединения с количеством заклепок и их статистическими характеристиками, которое обеспечивает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Литература

- [1] Тагер А.А. *Физико-химия полимеров*. Москва, Научный мир, 2007. 576 с.
- [2] Волков С.С. Технологические возможности ультразвуковой сварки капролона. *Сварочное производство*, 2008, № 8, с. 29–35.
- [3] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [4] Волков С.С. Ультразвуковая сварка изделий круглой формы из полиамида 610. *Сварочное производство*, 2010, № 8, с. 42–46.
- [5] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Welding International*, 2016, vol. 30(2), pp. 150–154.
- [6] Волков С.С. Ультразвуковая стыковая сварка жестких пластмасс. *Сварочное производство*, 2011, № 9, с. 15–20.

- [7] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Welding International*, 2003, vol. 17(6), pp. 482–486.
- [8] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, vol. 26(10), pp. 796–799.
- [9] Volkov S.S. Using piezoelectric oscillating system for welding synthetic fabrics. *Welding International*, 2013, vol. 27(7), pp. 720–724.
- [10] Маслов Б.Г., Выборнов А.П. *Производство сварных конструкций*. Москва, Академия, 2015. 288 с.

References

- [1] Tager A.A. *Fiziko-khimiia polimerov* [Physical chemistry of polymers]. Moscow, Nauchnyi mir publ., 2007. 576 p.
- [2] Volkov S.S. Tekhnologicheskie vozmozhnosti ul'trazvukovoi svarki kaprolona [Manufacturing capability for kaprolon B ultrasonic sealing]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding International]. 2008, no. 8, pp. 29–35.
- [3] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymeric materials]. Moscow, Khimiia publ., 2001. 376 p.
- [4] Volkov S.S. Ul'trazvukovaia svarka izdelii krugloi formy iz poliamida 610 [Ultrasonic weld of the rounded products from the polyamide 610]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding International]. 2010, no. 8, pp. 42–46.
- [5] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Welding International*, 2016, vol. 30(2), pp. 150–154.
- [6] Volkov S.S. Ul'trazvukovaia stykovaia svarka zhestkikh plastmass [Ultrasonic butt-seam welding of rigid plastic]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding International]. 2011, no. 9, pp. 15–20.
- [7] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Welding International*, 2003, vol. 17(6), pp. 482–486.
- [8] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, vol. 26(10), pp. 796–799.
- [9] Volkov S.S. Using piezoelectric oscillating system for welding synthetic fabrics. *Welding International*, 2013, vol. 27(7), pp. 720–724.
- [10] Maslov B.G., Vybornov A.P. *Proizvodstvo svarnykh konstruksii* [Production of welded constructions]. Moscow, Akademiia publ., 2015. 288 p.

Статья поступила в редакцию 19.10.2017

Информация об авторах

ВОЛКОВ Станислав Степанович (Москва) — кандидат технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, e-mail: map@bmstu.ru).

НЕРОВНЫЙ Вячеслав Михайлович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, e-mail: vmn@bmstu.ru).

СТАНКЕВИЧ Игорь Васильевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, e-mail: aplmex@yandex.ru).

Information about the authors

VOLKOV Stanislav Stepanovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: map@bmstu.ru).

NEROVNYY Vyacheslav Mikhailovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vmn@bmstu.ru).

STANKEVICH Igor Vasilievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Applied Mathematics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aplmex@yandex.ru).