

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ДЕТАЛЯХ
ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ**

Попов С.Д., Русанов А.Н.

Реферат. При ремонте сельскохозяйственной техники широко используется запрессовка ремонтных втулок для восстановления изношенных деталей. В процессе сборки соединения в охватывающей детали зачастую образуются трещины, причиной которых могут служить как дефекты её поверхности, так и дефекты структуры. Поэтому повышение трещиностойкости прессового соединения при сборке является актуальной задачей. В работе проведен анализ влияния геометрии охватывающей детали на сопротивление разрушению. Так как полную информацию о дефектах методами неразрушающего контроля возможно получить лишь в отдельных случаях, использована методика моделирования дефектов поверхностной трещины полуэллиптической формы. Для оценки трещиностойкости используется силовой критерий механики разрушения – коэффициент интенсивности напряжений. В результате было установлено, что существенное влияние на трещиностойкость прессового соединения оказывает соотношение между толщиной стенки охватывающей детали и ее наружным диаметром, что позволяет за счет изменения этих параметров снижать вероятность зарождения и развития трещин. Такая методика может быть использована в случаях, когда для сборки соединения используется механический – с помощью пресса и термический – с нагревом охватывающей детали, способы сборки. Наибольшая прочность соединения достигается при охлаждении охватываемой детали в процессе сборки, но в этом случае вероятность образования и роста трещин повышается. Это связано с уменьшением критического коэффициента интенсивности напряжений (вязкости разрушения), являющегося механической характеристикой трещиностойкости при понижении температуры охватывающей детали. Снизить влияние этого фактора можно применением комбинированного способа сборки соединения с помощью охлаждения охватываемой и нагрева охватывающей детали. Для оценки сопротивления разрушению при низких температурах оптимальным является проведение натурных испытаний, где в качестве факторов эксперимента выступают температуры охлаждения и нагрева деталей прессового соединения.

Ключевые слова: соединение с натягом, трещиностойкость, растягивающие напряжения, коэффициент интенсивности напряжений, вязкость разрушения.

Введение. В настоящее время одними из наиболее распространенных неподвижных соединений являются соединения с гарантированным натягом, поэтому исследование влияния конструктивных и технологических факторов на прочность соединения является актуальной задачей.

При ремонте соединений способом вставки ремонтной втулки при сборке зачастую наблюдается появление трещин в охватывающей детали. При уменьшении величины натяга возможен сдвиг деталей и потеря герметичности [1, 2, 3].

Целью исследования является предотвращение трещинообразования в деталях и обеспечение надежности соединений с натягом.

Условия, материалы и методы исследований. Прессовые соединения состоят из двух деталей (рисунок 1а) [3]. Натяг возникает вследствие разности диаметров охватываемой и охватывающей деталей. При сборке в соединении возникают силы трения, препятствующие их взаимному смещению.

Несущую способность соединения обеспечивает контактное давление, которое возникает в стыке деталей после запрессовки. Это

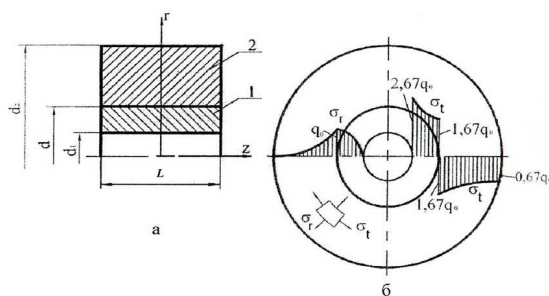


Рисунок 1 – Гладкое цилиндрическое соединение с натягом: а – конструктивная схема; б – графики распределения напряжений в деталях соединения; 1 – охватываемая деталь (вал); 2 – охватывающая деталь

давление должно быть таким, чтобы силы трения превышали внешние сдвигающие силы.

При действии внешней осевой силы P_{oc} величина контактного давления q_{oc} вычисляется по формуле:

$$q_{oc} \geq P_{oc} K / \pi d L, \quad (1)$$

где K – коэффициент запаса сцепления, $K = 1,5-2,0$, f – коэффициент трения, L – длина стыка.

При нагружении вращающим моментом $M_{вр}$:

$$q_{вр} \geq 2M_{вр} K / f\pi d^2 L. \quad (2)$$

При совместном действии осевой силы и вращающего момента:

$$q_{\Sigma} \equiv \sqrt{q_{ос}^2 + q_{вр}^2}. \quad (3)$$

В случае, когда соединяемые детали представляют собой толстостенные цилиндры, их деформации упругие, соединение работает при статическом нагружении и в соединении действует линейно изменяющееся контактное давление, для оценки прочности используются формулы Ламе. Этот метод подробно рассмотрен в работе [3].

Контактное давление q_0 , возникающее в стыке соединения после прессовки (рисунок 1б), определяется по формуле:

$$q_0 = \delta / d (C_1/E_1 + C_2/E_2), \quad (4)$$

где C_1, C_2 – коэффициенты, зависящие от диаметров d_1, d, d_2 и коэффициентов Пуассона m_1, m_2 соединяемых деталей; E_1, E_2 – модули упругости; d – натяг.

Под действием давления q_0 в деталях возникают радиальные s_r и окружные s_t напряжения. Эпюры напряжений s_r и s_t приведены на рисунке 1б.

Таким образом, контактное давление в прессовом соединении зависит от соотношения диаметров деталей.

Обычно вал изготавливают из более прочного материала, поэтому необходимо обеспечить отсутствие пластических деформаций в охватываемой детали. По третьей теории прочности условие прочности имеет вид:

$$\sigma_{экв} \equiv \sigma_t - \sigma_r = \frac{2q_0}{1 - (d/d_2)} \leq \sigma_{T_2}, \quad (5)$$

где σ_{T_2} – предел текучести материала охватываемой детали.

Следовательно, предельную величину контактного давления q_t можно определить по формуле:

$$q_t \equiv 0,5 \sigma_{T_2} \left[1 - (d/d_2)^2 \right] \quad (6)$$

Традиционный расчет на прочность не позволяет оценить трещиностойкость деталей прессовых соединений, поэтому необходимы дополнительные условия, учитывающие возможность зарождения и распространения трещин в соединяемых деталях.

Оценка несущей способности деталей, основанная на номинальных разрушающих напряжениях, определяемых по пределу текучести и пределу прочности, не учитывает того обстоятельства, что детали могут содержать различные дефекты (раковины, дефекты

структуры, трещины и т.д.), и выявить их возможно далеко не всегда. Однако наличие трещин не означает, что конструкция неработоспособна. В вязких состояниях в деталях трещины не вызывают разрушения, т.к. в зонах концентрации образуются пластические деформации, и происходит перераспределение напряжений, что тормозит развитие трещин.

В хрупких состояниях при наличии дефектов разрушающие напряжения могут оказаться в 1,5÷4 раза ниже предела текучести, и даже малые трещины могут привести к разрушению. Для анализа сопротивления элементов конструкций хрупкому разрушению используются энергетические, силовые и деформационные критерии линейной механики разрушения. К энергетическим критериям относятся плотность поверхностной энергии γ_K и энергия продвижения трещины G_{Ic} , к силовым – критические значения коэффициентов интенсивности напряжений K_{Ic} , к деформационным – раскрытие в вершине трещины δ_K . Оценка прочности элементов конструкций с помощью механики разрушения основана на решении задач теории упругости и результатах экспериментов по определению критериев разрушения [4].

Рост трещины может происходить по типу I, при котором относительные перемещения берегов перпендикулярны поверхности трещины и по типу II и III, когда происходят сдвиговые перемещения берегов перпендикулярно или параллельно фронту трещины. В посадках с натягом, как правило, наблюдаются трещины типа I.

Поля напряжений в окрестности вершины такой трещины описываются с помощью коэффициента интенсивности напряжений K_I [5]:

$$K_I \equiv \sigma \sqrt{\pi l Y}, \quad (7)$$

где σ – напряжения в теле с трещиной, l – длина трещины, Y – поправка на геометрию и схему нагружения (K – тарировка).

Формулы для определения K_I содержатся в [6, 7].

Трещина начинает распространяться тогда, когда коэффициент интенсивности напряжений достигает критической величины:

$$K_I \equiv K_{Ic}, \quad (8)$$

где K_{Ic} – критический коэффициент интенсивности напряжений (вязкость разрушения), который определяется по результатам лабораторных испытаний образцов, содержащих трещины и является механической характеристикой трещиностойкости твердого тела.

Хрупким считается разрушение, происходящее без заметных пластических деформаций, при котором нестабильный рост трещин

происходит при напряжениях меньше предела текучести.

С понижением температуры большинство малоуглеродистых и легированных сталей изменяет свои механические свойства. Предел текучести и предел прочности повышаются, а пластичность падает. K_{Ic} также снижается. Например, для стали 22К получены зависимости, показанные на рисунке 2 [8].

По данным, представленным на рисунке 2, можно выделить три типа разрушения – вязкие, квазихрупкие и хрупкие. Вязкие разрушения сопровождаются большими упругопластическими деформациями ($e_i > 50\%$, $y_k > 0,4$), номинальные разрушающие напряжения превышают предел текучести ($s_c > s_T$) и происходят при температурах больших первой критической температуры t_{c1} , определяемой по критерию вязкой составляющей в изломе F_β ($F_\beta \leq 0,5$). Интервал температур $t_{c2} \leq t \leq t_{c1}$ соответствует квазихрупким разрушениям, когда e_i и y_k снижаются, однако $s_c > s_T$. Вторая критическая температура t_{c2} устанавливается по критерию $s_c \leq s_T$ и характеризует переход от квазихрупких к хрупким разрушениям. Таким образом, ЛУМР применима при $t^0 \leq t_{c2}$ [8].

Критические температуры хрупкости t_{c1} и t_{c2} существенно повышаются при увеличении размеров трещин и сечений. Эти зависимости для малоуглеродистых и низколегированных сталей по данным [8] приведены на рисунке 3 и рисунке 4.

Таким образом, сопротивление разрушению элементов конструкций зависит от размеров дефектов, сечений и от температуры. Причем зависимость разрушающих напряжений от этих факторов различна для хрупких, квазихрупких и вязких разрушений.

Анализ и обсуждение результатов. Для оценки влияния геометрии охватывающей детали в прессовом соединении на ее трещиностойкость можно воспользоваться методи-

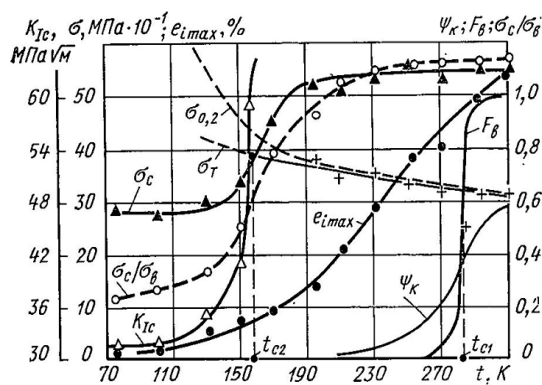


Рисунок 2 – Результаты статических испытаний при нормальных и пониженных температурах стали 22К (сечение 20×50 мм)

кой моделирования дефектов, широко применяемой для труб, нагруженных внутренним давлением, в которых наиболее часто встречаются несквозные поверхностные трещинообразные дефекты, форма фронта которых близка к полуэллиптической кривой. Так как методами неразрушающего контроля полную информацию о таких дефектах удается получить лишь в отдельных случаях, то в отечественной и зарубежной практике дефекты принято аппроксимировать трещиной полуэллиптической формы [9, 10]. Наиболее опасна ориентация расчетной трещины перпендикулярно наибольшим растягивающим напряжениям. Поскольку трещины в охватывающих деталях, как правило, имеют осевую ориентацию и зарождаются на ее поверхности, ограничимся рассмотрением только этого случая.

Пусть поверхностный дефект представляет собой полуэллиптическую трещину на поверхности охватывающей детали, нагруженной внутренним контактным давлением. Трещина имеет продольную ориентацию, l – глубина дефекта, a – его полудлина (рисунок 5).

В работе [11] сделан обзор формул для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений K_I в трубах и сосудах давления с поверхностными трещинами. Приведенные

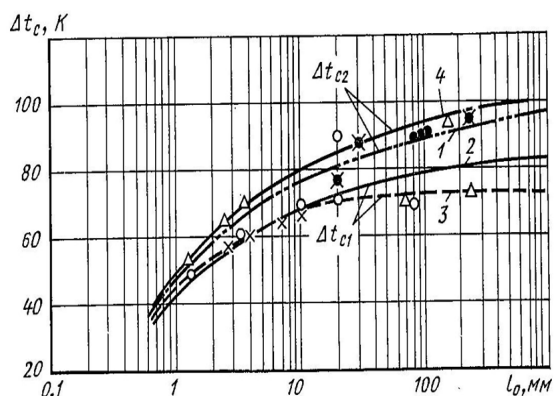


Рисунок 3 – Зависимость смещений критических температур от размеров трещин

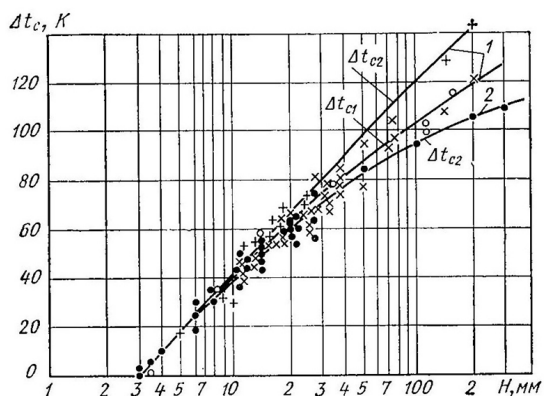


Рисунок 4 – Зависимость смещений критических температур от толщины сечений

формулы имеют сложную структуру, и их применение для инженерных расчетов достаточно затруднительно. Поэтому для определения K_I в рассматриваемом случае целесообразно воспользоваться методикой, предложенной в работе [12], где для определения безразмерных коэффициентов M_p используется метод конечных элементов:

$$M_p \equiv \frac{K_I t}{PR_{cp} \sqrt{\pi l}}, \quad (9)$$

где $R_{cp}=(D-t)/2$ – средний радиус трубы. M_p является инвариантным по отношению к диаметру трубы D и к толщине стенки t .

В работе содержатся таблицы для определения M_p для различных соотношений l/t и l/a для точек A и B фронта трещины. Зная величину рабочего давления P расчет коэффициентов интенсивности напряжений для труб с осевой трещиной можно выполнять по формуле:

$$K_I \equiv M_p \frac{PR_{cp}}{t} \sqrt{\pi l} \quad (10)$$

Подставим в (10) $R_{cp}=(D-t)/2$. Тогда

$$K_I \equiv \frac{M_p}{2} \left(\frac{D}{t} - 1 \right) P \sqrt{\pi l} \quad (11)$$

Полагая $P=q=const$ и $l=const$ по формуле (11) можно получить зависимость K_I от t/D .

По данным [13], цилиндр считается толстостенным, если $t > R_{cp}/10$, чему соответствует $t/D \approx 0,05$. Ограничиваясь неглубокими дефектами достаточно большой протяженности, наиболее опасными по данным [14], можно принять $l/t=0,2$ и $l/a=0,2$, чему соответствует $M_p=1,076$.

Зависимость K_I в наиболее опасной точке фронта трещины A от соотношения толщины стенки t и диаметра D охватывающей детали представлена на рисунке 6.

На рисунке 6 показано, что K_I существенно зависит от отношения t/D , которое можно изменять, либо увеличивая толщину стенки t , либо уменьшая наружный диаметр охватывающей детали, снижая таким образом K_I и добиваясь выполнения условия трещиностойкости:

$$K_I < K_{Ic} \quad (12)$$

При этом также должно выполняться условие прочности (5).

Применение силового критерия K_I в данном случае оправдано, т.к. напряжения вблизи поверхности охватывающей детали существенно меньше предела текучести согласно условию (6) и рисунку 1б.

Рассмотренный способ повышения трещиностойкости пригоден в случаях, когда используется механический способ сборки (на прессах) и термический, при котором для по-

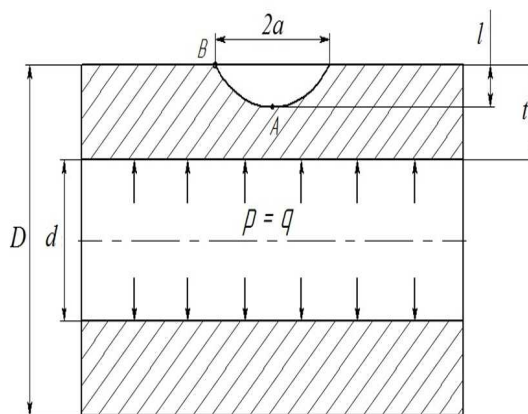


Рисунок 5 – Схема поверхностного дефекта

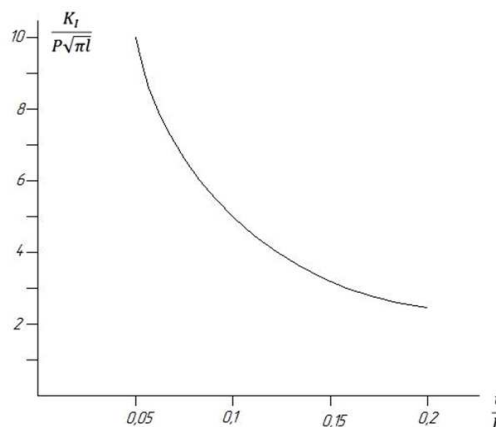


Рисунок 6 – Зависимость K_I в точке A фронта трещины от отношения толщины стенки t к диаметру охватывающей детали D

лучения монтажного зазора между деталями производится нагрев охватывающей детали, т.к. при этом K_{Ic} не уменьшается (рисунок 2) Прочность посадок, полученных термическим способом, в 2-2,5 раза превышает прочность соединений, полученных запрессовкой. Однако при этом способе возможно изменение структуры и механических свойств материала и возникновение микротрещин из-за температурных напряжений.

Наибольшая прочность соединений получается при охлаждении охватываемой детали – на 10-15% выше прочности соединений полученных с нагревом охватывающей детали [3]. Охлаждение до температуры -190°C производится с помощью жидкого азота, до -75°C – твердой углекислотой.

К недостатку данного метода можно отнести повышенную вероятность образования трещин, что связано с уменьшением K_{Ic} при понижении температуры охватывающей детали после сборки. При достижении второй критической температуры T_{c2} происходит резкое снижение сопротивления разрушению (рисунок 2).

Температурная зависимость K_{Ic} от T_{c2} определяется по формуле [4]:

$$K_{Ic} = \overline{K_{Ic}} \exp[-\beta_K (T_{c2} - T)] \quad (13)$$

где $\overline{K_{Ic}}$ – это коэффициент интенсивности напряжений при температуре испытаний T_{c2} . Коэффициент β_K зависит от предела текучести и условий инициирования и остановки трещин:

$$\overline{K_{Ic}} = K_{Ic}^* \exp[-\overline{\beta_K} (T_{c2} - T^*)] \quad (14)$$

где K_{Ic}^* – минимальное критическое значение коэффициента интенсивности напряжений при $\overline{\beta_K}$ температуре испытаний T^* . Коэффициент зависит от сопротивления стали хрупкому разрушению при температуре T_{c2} . K_{Ic}^* , β_K , $\overline{\beta_K}$, T_{c2} определяются экспериментально.

Сопротивление разрушению при $T_{c2} < T < T_{c1}$ (в квазихрупких состояниях) устанавливается на основе зависимости:

$$\sigma_K^* = \sigma_T \exp\left[-\beta_\sigma \frac{T - T_{c2}}{T_{c1} - T_{c2}}\right], \quad (15)$$

где σ_K^* – напряжения по нетто сечению, σ_T – предел текучести при температуре T , $\beta_{K\sigma}$ – постоянная, зависящая от свойств стали,

напрягаемых объемов и условий испытания. Определяется по результатам испытаний при температуре, равной первой критической $T=T_{c1}$.

Таким образом, для оценки сопротивления разрушению при низких температурах требуется проведение большого количества сложных и дорогостоящих лабораторных испытаний. Значительно проще сделать это при натуральных испытаниях.

Выводы. Как следует из вышеизложенного, для повышения трещиностойкости охватываемой детали при механическом и термическом способах сборки можно изменять соотношение между толщиной ее стенки и наружным диаметром, добиваясь выполнения условия трещиностойкости. В случае охлаждения охватываемой детали необходимо, чтобы ее температура после сборки и охлаждения была выше второй критической T_{c2} . Добиться этого можно применением комбинированного способа сборки посадки путем охлаждения охватываемой детали и нагрева до небольшой температуры (не более 100°-120°С) охватываемой детали. Для этого необходимо поставить двухфакторный эксперимент, где в качестве факторов выступают температуры охлаждения и нагрева деталей прессового соединения.

Литература

1. Редреев Г.В., Евстифеев В.В., Русанов А.Н., Евсеев Ю.А. Надежность посадки с натягом при восстановлении крышки корпуса турбокомпрессора. // Омск: Вестник СибАДИ, –№2(42), –2015. – С.37-40.
2. Редреев Г.В., Попов С.Д., Редреев П.Г., Русанов А.Н. Надежность тонкостенных деталей в посадках с натягом // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL: www.science-education.ru/125-19749 (дата обращения: 10.04.2017).
3. Рязанцева И.Л. Теория и проектирование соединений с гарантированным натягом. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 161 с.
4. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. – М.: Машиностроение, 1973. – 201 с.
5. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.
6. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. В 2-х томах. / Пер. с англ. Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990
7. Хеллан К. Введение в механику разрушения: / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
8. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
9. Леонов В.П., Васильев А.К. Разработка подходов к нормированию технологической дефектности сварных соединений конструкций различного назначения. // Вопросы материаловедения. – 2007. – №3(51). – С. 187-203
10. Скворцов Ю.В., Глушков С.В. Моделирование несквозных поверхностных трещин в тонкостенных конструкциях. Вестник СГАУ. – 2011. – №3(27). – Ч. 4. – С. 187-191
11. Глушков С.В., Скворцов Ю.В., Перов С.Н. Сравнение результатов решения задачи механики разрушения для трубы с несквозной трещиной // Вестник ПНИПУ. – 2014. – №3. – С. 36-46
12. Перов С.Н., Скворцов Ю.В., Цапуринов К.А. Коэффициенты интенсивности напряжений для труб с несквозными трещинами. // Известия Самарского научного центра РАН. т. 10. – №3. – 2008. – С. 905-910
13. Справочник по сопротивлению материалов. / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. // ; Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
14. Брок Д. Основы механики разрушения. / Пер. с англ. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.

Сведения об авторах:

Попов Сергей Дмитриевич – старший преподаватель, e-mail: sd.popov@omgau.org
 ФГБОУ ВО Омский государственный аграрный университет, г. Омск, Россия.
 Русанов Анатолий Николаевич – заведующий мастерской, e-mail: nml6464@mail.ru
 ОАО «Черлакросервис», п. Черлак, Омская обл., Россия.

**PREVENTION OF CRACK FORMATION IN DETAILS IN PROVISION OF RELIABLE COMPOUNDS
WITH A TENSION**

Popov S.D., Rusanov A.N.

Abstract. When repairing agricultural machinery, the pressing of repair bushings for the restoration of worn parts is widely used. In the process of assembling a joint in the external part, cracks are often formed, which can be caused either by defects in its surface or by structural defects. Therefore, increasing the crack growth resistance of the press connection during assembly is an urgent task. The work analyzes the impact of the geometry of the external part on the resistance to fracture. Since it is possible to obtain complete information on defects by nondestructive testing methods only in individual cases, a technique for modeling the defects of the surface crack of a semielliptical shape was used. To evaluate the crack resistance, the force criterion of fracture mechanics is used - the stress intensity factor. As a result, it was found that the relationship between the thickness of the wall of the external part and its outer diameter makes a significant impact on the fracture toughness of the compression joint, which makes it possible to reduce the probability of nucleation and development of cracks by changing these parameters. Such a technique can be used in cases where the mechanical assembly is used for assembling the connection - by means of a press and a thermal one - with heating of the external part, methods of assembly. The greatest strength of the connection is achieved by cooling the internal part during assembly, but in this case the probability of formation and growth of cracks increases. This is due to a decrease in the critical stress intensity factor (fracture toughness), which is a mechanical characteristic of crack resistance when the temperature of the external part is lowered. The effect of this factor can be reduced by using a combined method of assembling the joint by cooling the internal and heating the external part. To evaluate the fracture resistance at low temperatures, it is optimal to carry out full-scale tests, where the cooling and heating temperatures of the press connection parts act as experimental factors.

Key words: joint with interference, crack resistance, tensile stresses, stress intensity factor, fracture toughness.

Reference

1. Redreev G.V., Evstifeev V.V., Rusanov A.N., Evseev Yu.A. Reliability of landing with interference when restoring the cover of the turbocharger housing. [Nadezhnost posadki s natyagom pri vosstanovlenii kryshki korpusa turbokompresora]. Omsk: *Vestnik SibADI. – The herald of SibADI.* – №2(42), –2015. – P. 37-40.
2. Redreev G.V., Popov S.D., Redreev P.G., Rusanov A.N. *Nadezhnost tonkostennykh detaley v posadkakh s natyagom. // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* [Reliability of thin-walled parts in fittings with interference. // Modern problems of science and education]. 2015. – № 1; Available at: www.science-education.ru/125-19749 (date of access: 10.04.2017).
3. Ryazantseva I.L. *Teoriya i projektirovanie soedineniy s garantirovannym natyagom.* [Theory and design of connections with guaranteed interference]. – Omsk: Izd-vo OmGTU, 2015. – P. 161.
4. Makhutov N.A. *Soprotivlenie elementov konstruksiy khрупkomu razrusheniyu.* [Resistance of structural elements to brittle fracture]. – M.: Mashinostroenie, 1973. – P. 201.
5. Matvienko Yu.G. *Modeli i kriterii mekhaniki razrusheniya.* [Models and criteria for fracture mechanics]. – M.: FIZMATLIT, 2006. – P. 328.
6. *Spravochnik po koeffitsientam intensivnosti napryazheniy. V 2-kh tomakh. / Per. s angl.* [Handbook on stress intensity factors. In 2 volumes. / Translated from English]. Edited by Yu. Murakami. – M.: Mir, 1990
7. Khellan K. *Vvedenie v mekhaniku razrusheniya: / Per. s angl.* [Introduction to the fracture mechanics: translated from English]. – M.: Mir, 1988. – P. 364.
8. Makhutov N.A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruksiy na prochnost.* [Deformation criteria for destruction and calculation of structural elements for strength]. – M.: Mashinostroenie, 1981. – P. 272.
9. Leonov V.P., Vasilev A.K. Development of approaches to the standardization of technological defects in welded joints of structures for various purposes. [Razrabotka podkhodov k normirovaniyu tekhnologicheskoy defektnosti svarnykh soedineniy konstruksiy razlichnogo naznacheniya]. // *Voprosy materialovedeniya. - Problems of materials science.* – 2007. – №3(51). – P. 187-203
10. Skvortsov Yu.V., Glushkov S.V. Simulation of non-penetrative surface cracks in thin-walled structures. [Modelirovanie neskvoznykh poverkhnostnykh treschin v tonkostennykh konstruksiyakh]. *Vestnik SGAU. – The herald of SSAU.* – 2011. – №3(27). – Part 4. – P. 187-191
11. Glushkov S.V., Skvortsov Yu.V., Perov S.N. Comparison of the results of solving the fracture mechanics problem for a pipe with a blind crack. [Sravnenie rezultatov resheniya zadachi mekhaniki razrusheniya dlya truby s neskvoznoy treschinoy]. *Vestnik PNIPU. - Herald of PNIDU.* – 2014. – №3. – P. 36-46
12. Perov S.N., Skvortsov Yu.V., Tsapurin K.A. Coefficients of stress intensity for pipes with blind cracks. [Koeffitsienty intensivnosti napryazheniy dlya trub s neskvoznymi treshchinami]. // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. - Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* Vol. 10. – №3. – 2008. – P. 905-910
13. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov.* [Handbook on the resistance of materials]. / Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. // Kiev: Nauk. dumka, 1988. – P. 736.
14. Broek D. *Osnovy mekhaniki razrusheniya. / Per. s angl.* [Fundamentals of fracture mechanics. / translated from English]. – M.: Vysshaya shkola, 1980. – P. 368.

Authors:

Popov Sergey Dmitrievich – Senior Lecturer, e-mail: sd.popov@omgau.org
Omsk State Agrarian University, Omsk, Russia.
Rusanov Anatoliy Nikolaevich – head of the workshop, e-mail: nml6464@mail.ru
OAO “Cherlakagroservice”, Cherlak village, Omsk region.