

УДК 621.87

ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ВАЛ-ШЕСТЕРНИ ЭКСКАВАТОРА ЭКГ8

©Малицкий И. Ф., Смирнов И. П.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Малицький Ігор Федорович: ORCID: 0000-0003-0026-2791; malickiy1925@mail.ru; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Смирнов Ігор Петрович: ORCID: 0000-0002-5982-8123; smirnov_ip@mail.ru; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Метод модульного ремонту економічно нецелесообразен в случае, если ремонт вызван выходом из строя трудоемких и материалоемких деталей, себестоимость изготовления которых достаточно высока. Целью данной статьи является развитие одного из принципов конструирования крупногабаритных деталей машин для улучшения качества проектируемого изделия, а именно – повышение его ремонтпригодности и выявления наиболее технологичных решений для реализации этого принципа. Один из путей снижения себестоимости ремонта – заранее проектировать деталь составной с возможностью замены только той части, которая подвергается износу.

Рассмотрены проблемы создания ремонтпригодных конструкций машин и проведения ремонтных работ. Получили дальнейшее развитие принципы конструирования крупногабаритных деталей машин и оборудования для улучшения качества проектируемого изделия. Выявлены наиболее технологичные и экономичные решения для реализации принципа ремонтпригодности.

Предложена более технологичная и экономичная сборная конструкция вал-шестерни экскаватора ЭКГ8 на основе сборки вала с шестерней методом термического воздействия – нагревом шестерни в индукторе токами промышленной частоты.

Ключевые слова: технологичность; ремонт; ремонтпригодность; крупногабаритные детали; трудоемкость; материалоемкость; вал; шестерня; экскаватор; индукционный нагрев; натяг; прочность; контактное давление.

Малицький І. Ф., Смирнов І. П. «Технологічність конструкції вал-шестерні экскаватора ЕКГ8».

Метод модульного ремонту економічно недоцільний у разі, якщо ремонт викликаний виходом з ладу трудомістких та матеріаломістких деталей, собівартість виготовлення яких досить висока. Метою даної статті є розвиток одного з принципів конструювання великогабаритних деталей машин для поліпшення якості проєктованого виробу, а саме – підвищення його придатності ремонту та виявлення найбільш технологічних рішень для реалізації цього принципу. Один із шляхів зниження собівартості ремонту – заздалегідь проєктувати деталь складовою з можливістю заміни тільки тієї частини, яка піддається зносу.

Розглянуто проблеми створення придатних до ремонту конструкцій машин і проведення ремонтних робіт. Отримали подальший розвиток принципи конструювання великогабаритних деталей машин та устаткування для поліпшення якості проектного виробу. Виявлено найбільш технологічні та економічні рішення для реалізації принципу ремонтпридатності.

Запропонована технологічна і економічна збірна конструкція вал-шестерні екскаватора ЕКГ8 на основі складання валу з шестірнею методом термічного впливу – нагрівом шестерні в індукторі струмами промислової частоти.

Ключові слова: технологічність; ремонт; ремонтпридатність; великогабаритні деталі; трудомісткість; матеріаломісткість; вал; шестерня; екскаватор; індукційний нагрів; натяг; міцність; контактний тиск.

Malicky I, Smirnov I. “Manufacturability construction shaft-gear excavator EKG-8”.

Method of module repair is economically feasible if the repair is caused by the failure of the labor-intensive and material-intensive parts of the manufacturing cost which is quite high. The purpose of this article is the development of one of the design principles, large-sized machine parts to improve the quality of a designed product, namely, increasing the suitability of repair and identify technological solutions to implement this principle. One of the ways to reduce the cost of repairs – pre-engineering part with the possibility of replacing only the part that is subject to wear and tear.

Considered the problem of creating suitable for the structural repair of machinery and repair work. Further development of design principles of large parts of machines and equipment to improve the quality of a designed product. The most technologically advanced and economical solutions for the implementation of the principle of maintainability.

Offered more technologically advanced and economical design shaft gear excavator EKG-8 on the basis of the shaft compound with a gear by the method of thermal effects – heating of the gears in the inductor currents of industrial frequency.

Key words: workability; repair; maintainability; large parts; labor intensity; material consumption; shaft; gear; excavator; induction heating; tightness; durability; contact pressure.

1. Актуальность

Выпуск высококачественных и высокопроизводительных машин с наименьшими затратами, является одной из главных задач машиностроения. Поэтому вопросу технологичности машин, то есть созданию конструкций, позволяющих в конкретных производственных условиях изготавливать машины с высокими эксплуатационными качествами и минимальными технологическими затратами, необходимо уделять особое внимание.

При проектировании машин, необходимо предусматривать вопросы технологичности не только в процессе эксплуатации, но и при ремонте машин.

Технологія машинобудування

Создание ремонтпригодных конструкций изделий машиностроения и собственно проведение ремонтных работ, являются важными и взаимосвязанными задачами, от решения которых зависит качество и, следовательно, дальнейшая успешная эксплуатация изделий.

Как известно, качество изделий зависит от качества составляющих его узлов и деталей, а именно - степени их соответствия нормативным документам, в частности, чертежам и техническим требованиям, согласно которым они изготовлены. Качество самих этих нормативных документов оценивается только на соответствие их ЕСКД и не затрагивает соответствие предусмотренных в них конструктивных решений современному уровню развития науки и техники. Иными словами, оценка качества проектируемого изделия не как совокупности качества отдельных элементов, из которой оно состоит, а как системы, предназначенной выполнять определенные функции, на стадии проектирования не всегда прогнозируется достаточно уверенно.

2. Целью данной статьи является развитие одного из принципов конструирования крупногабаритных деталей машин для улучшения качества проектируемого изделия, а именно – повышение его ремонтпригодности и выявления наиболее технологичных решений для реализации этого принципа.

3. Постановка проблемы

Развитие и совершенствование технологий позволяет изготавливать новые детали и стандартные узлы относительно качественными и недорогими по себестоимости. За счет относительной дешевизны их ремонт проводится простой заменой деталей и узлов, вышедших из строя, и исключает по технологии ремонтных работ их восстановление. Так поступают при замене подшипников, шаровых шарниров, небольших зубчатых колес, крепежных деталей и других.

Однако, данный метод модульного ремонта, нельзя считать экономически целесообразным в случае, если ремонт вызван выходом из строя трудо- и материалоемких деталей, себестоимость изготовления которых достаточно велика. В этом случае более рациональным является путь восстановления работоспособности негодных к эксплуатации деталей для повторного их использования.

Для осуществления такого восстановления трудо- и материалоемких деталей необходимо ещё на стадии проектирования учитывать в их конструкции возможность их повторного использования после ликвидации причины, вызвавшей потерю ими трудоспособности.

При прочностных и других расчетах конструкции конкретной детали коэффициенты запаса по различным видам напряженного состояния получаются разными, и при потере работоспособности детали по одному из признаков, деталь остается работоспособной по другим.

Наиболее часто причиной потери работоспособности механизма или изделия в целом является предельный износ одной из рабочих поверхностей одной из составляющих его деталей. Если к потере работоспособности привел износ трудо- и материалоемкой детали, то снизить затраты на ее восстановление можно восстановив только ту поверхность детали, которая подверглась предельному износу.

Применяемые в настоящее время методы ремонта предполагают наплавку, напайку, наваривание изношенной поверхности с последующей механической обработкой до номинальных размеров. Так восстанавливают, например, изношенные шейки коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания.

Особенно это касается тяжелонагруженных машин (подъемно-транспортные машины, землеройные и т.п.), работающих в сложных условиях, вследствие чего, многие узлы и детали часто выходят из строя и требуют ремонта или замены. Один из путей снижения себестоимости ремонта – заранее проектировать деталь составной с возможностью замены только той части, которая подвергается износу.

При этом составная деталь будет представлять сборочный узел, который должен соответствовать следующим требованиям:

- по прочностным характеристикам и геометрическим параметрам он не должна существенно отличаться от цельной детали;
- конструкция соединения должна предусматривать возможность разборки, причем часть, которая остается для повторного использования, не должна иметь повреждений контактных поверхностей;
- процесс соединения и разборки составных элементов должен быть достаточно технологичным не только на предприятии-изготовителе, но и в условиях ремонтного производства.

4. Основной материал

Для примера рассмотрим металлоемкую и трудоемкую в изготовлении вал-шестерню экскаватора ЭКГ8 (рисунок 1).

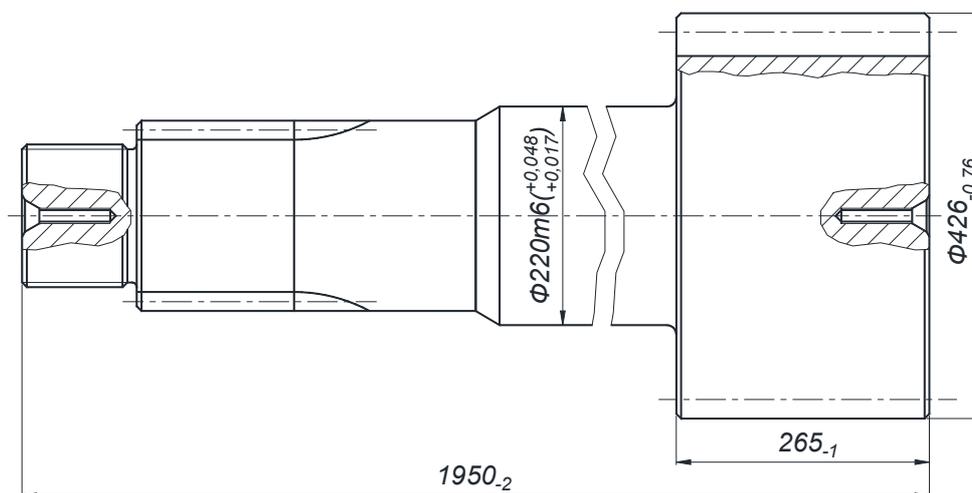


Рис. 1 – Вал шестерня экскаватора ЭКГ-8

При износе или поломке зубьев шестерни необходимо заменить вал-шестерню на новую, которую практически невозможно изготовить в условиях ремонтных мастерских. Таким образом, заводы изготовители должны поставлять запасные вал-шестерни или изготавливать их по заказу для осуществления ремонта. Кроме того, это приводит к большому расходу металла – общий вес вал-шестерни 550 кг. Очень трудоемок сам процесс замены вал-шестерни (позиция 17, рисунок 2) в редукторе поворота.

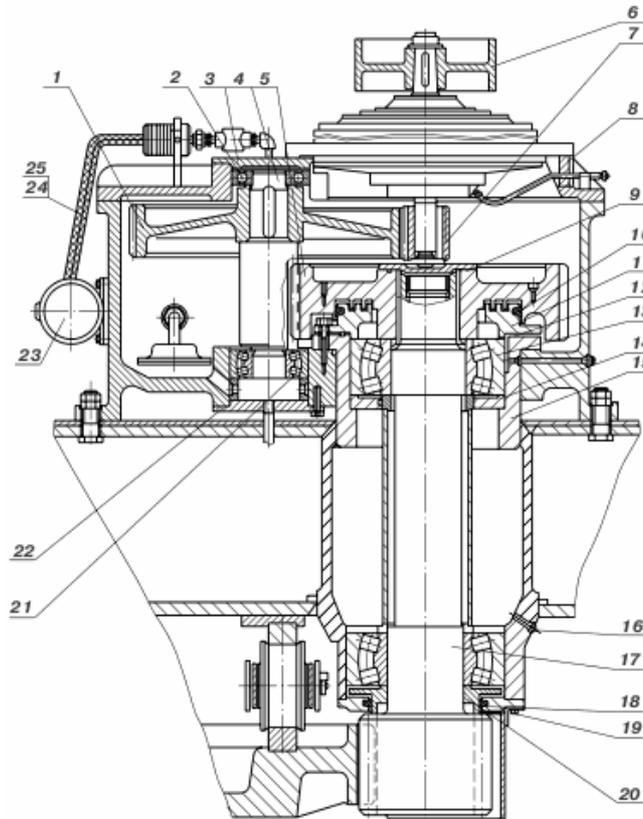


Рис. 2 – Редуктор поворота

Технологично виготовляти вал-шестерню не як цільну деталь, а виготовляти окремо вал і зубчасте колесо (рисунок 3) – це набагато знижує трудомісткість виготовлення і особливо трудомісткість заміни вишедшої з строю шестерні.

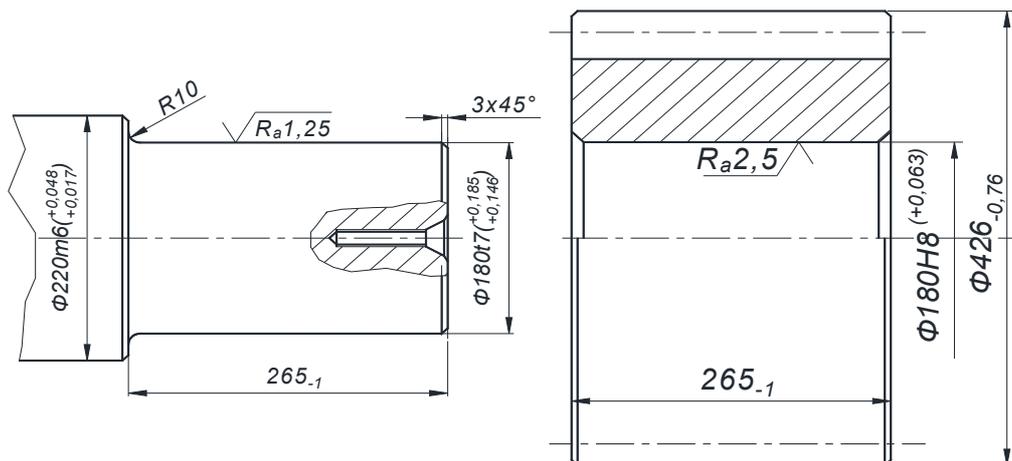


Рис. 3 – Элементы сборной единицы вал-шестерня

При этом экономится более 450 кг качественной стали. Наиболее приемлемым и удовлетворяющим перечисленным выше требованиям, является соединение составных деталей по посадке с натягом. Для обеспечения сборки деталей с натягом в настоящее время используют методы: прессовый, с охлаждением охватываемой детали, с нагревом охватывающей детали.

При использовании прессового метода при сборке и, особенно, разборке, не гарантируется целостность контактирующей поверхности детали, которая предназначена для повторного использования. К тому же при больших габаритах соединения данный метод требует наличия достаточно мощного пресса, что также может оказаться проблемой в условиях ремонтного производства.

Охлаждение охватываемой детали также связано с трудностями технологического характера и мерами по обеспечению безопасности при хранении и использовании хладагентов. Кроме того, данный метод позволяет получить разницу температур охватываемой и охватывающей деталей не более 180 °С и его оправдано применять в случае, когда по каким-либо причинам нежелательно подвергать охватываемую деталь интенсивному нагреву.

Наиболее приемлемым является подогрев охватывающей детали – проще технологическое оборудование, температуру нагрева ограничивают только физико-механические свойства материала детали. Подогрев охватывающей детали, может осуществляться в печах, в масляных ваннах. с использованием установок ТВЧ, газовых горелок, индукционного нагрева и так далее.

Здесь наибольший интерес вызывает индукционный нагрев. Преимущества индукционного нагрева по сравнению с другими методами следующие [1]:

- тепловая энергия генерируется непосредственно в материале детали, а не передается извне;
- нагреву подвергается не вся деталь целиком, а только необходимая локальная её часть;
- есть возможность обеспечить скоростной интенсивный нагрев охватывающей детали, предохранив при этом от нагревания охватываемую для обеспечения качественной разборки соединения;
- по сравнению с другими способами нагрева затраты энергии минимальны;
- простота управления режимом нагрева дает возможность автоматизировать процесс сборки-разборки.

К тому же, если сравнить подогрев крупногабаритных и небольших деталей, то для обеспечения в соединениях одинаковой величины натяга первые необходимо нагревать до меньшей температуры.

Соединение изготовленного вала с изготовленной отдельно шестерней (рисунок 4) осуществляется термовоздействием путем нагрева охватывающей детали – шестерни в универсальной модульной индукционно-нагревательной установке промышленной частоты, созданной по принципу агрегатирования [5]. Возможность такой сборки, обеспечивающей необходимый крутящий момент, подтвержден расчетами и экспериментальной проверкой.

Технико-экономические расчеты показали, что внедрение новой конструкции вал-шестерни обеспечит экономию затрат труда при ремонте каждого соединения 0,62 нормо-часа.

Для обеспечения взаимозаменяемости сборной и неразборной конструкций вал-шестерни все наружные габаритные и присоединительные размеры, сохраняются. В новой конструкции вводится только один дополнительный размер – диаметр сопрягаемых поверхностей. К этому размеру предъявляются два противоположных требования. Этот

Технологія машинобудування

размер должен быть как можно большим для обеспечения увеличения площади сопряжения и тем самым сил трения (H), что видно из формулы

$$F = \pi d L p_k f, \quad (1)$$

где d – номинальный диаметр сопряжения, м;
 L – длина сопряжения, м;
 p_k – контактное давление, Па;
 f – коэффициент трения.

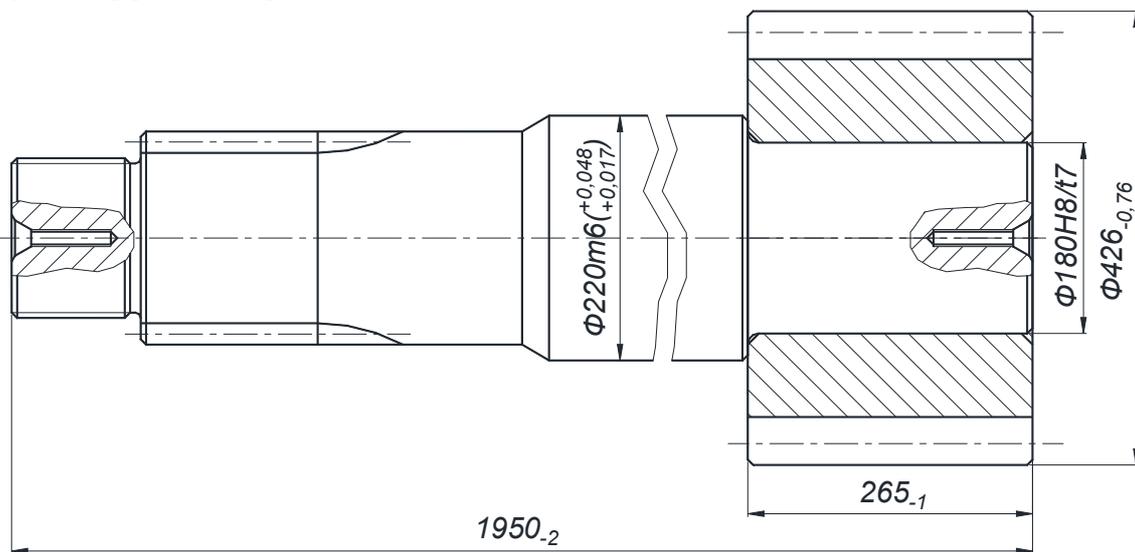


Рис. 4 – Соединение вала с изготовленной отдельно шестерней

С другой стороны, размер должен быть как можно меньше для увеличения контактного давления (Па), что видно из формулы

$$P_k = \frac{\delta E}{d \left(1 + \frac{(d/D)^2}{1 - (d/D)^2} \right)}, \quad (2)$$

где δ – натяг, м;
 E – модуль упругости, Па;
 D – наружный диаметр шестерни по впадинам между зубьями, м.

Подставив формулу (2) в формулу (1) и умножив на радиус трения получим формулу момента трения, Н·м

$$M_{mp} = \frac{\pi d L \delta E f}{2 \left(1 + \frac{(d/D)^2}{1 - (d/D)^2} \right)} = K L \delta E f, \quad (3)$$

где K – величина, зависящая от диаметров охватываемой детали, м

$$K = \frac{\pi d}{2 \left(1 + \frac{(d/D)^2}{1 - (d/D)^2} \right)} = \frac{\pi d}{4} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

На рисунке 5 приведен график зависимости величины K от диаметра сопряжения d .

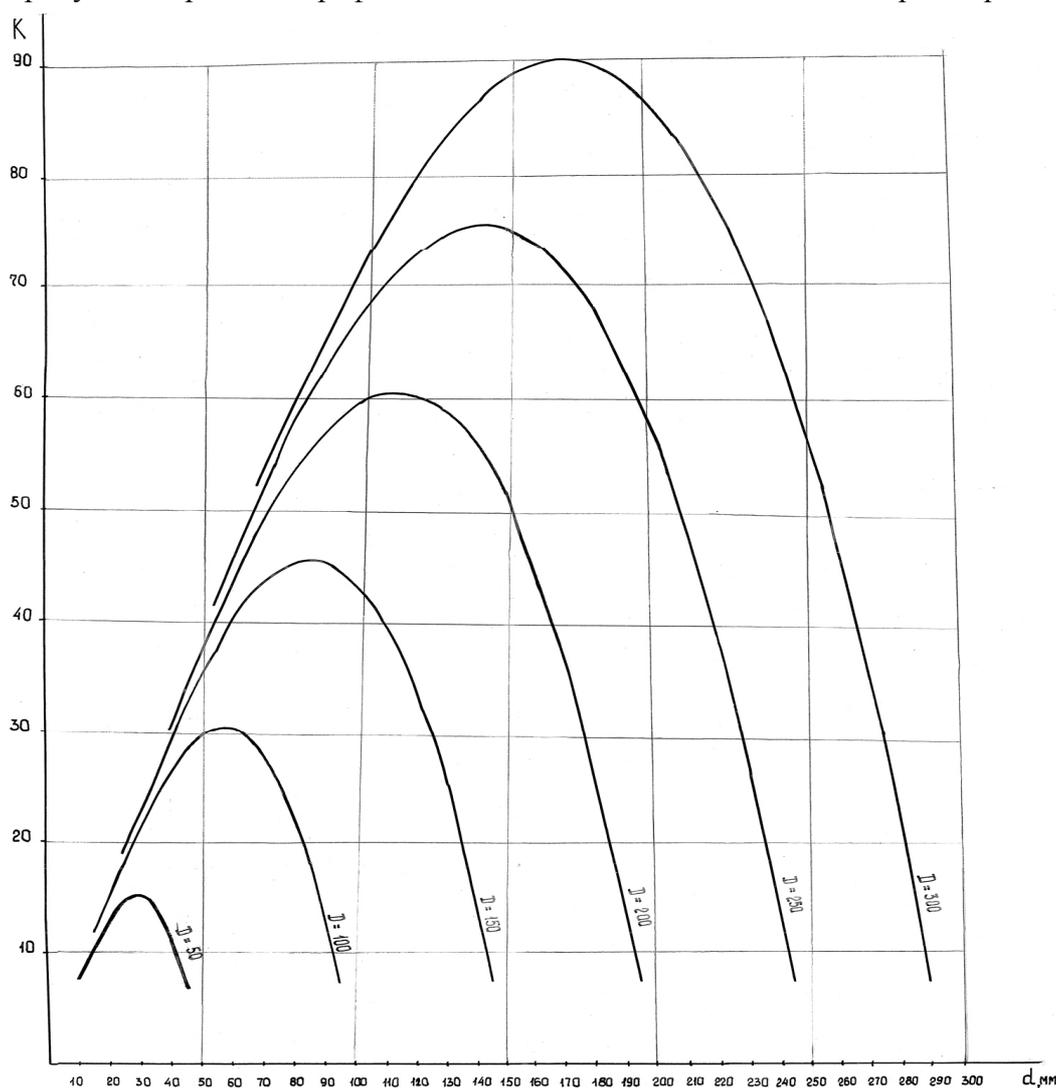


Рис. 5 – График зависимости величины « K » от диаметров охватываемой детали

Максимум величины K соответствует диаметру сопряжения $d = 180$ мм. Принимаем номинальный диаметр сопряжения 180 мм. При необходимости ремонта, этот диаметр может быть уменьшен до 170 мм без существенного уменьшения прочности сопряжения.

Произведем расчет необходимого натяга для сборки вала с шестерней. Минимальный расчетный натяг δ (мм) определяется из формулы (3) при максимальном скручивающем моменте $M = 20$ т·м.

Результаты расчета требуемого минимального натяга в зависимости от коэффициента трения, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Величина натягов в зависимости от коэффициента трения

Коэффициент трения, f	Минимально допустимый натяг δ , мм	Промежуточная среда
0,15	0,270	Без промежуточной среды
0,3	0,140	Минеральное масло
0,5	0,082	Технически чистые поверхности
0,8	0,051	Жидкое стекло

Технологія машинобудування

Сборка вала с втулкой осуществляется с монтажным зазором, путем нагрева шестерни в индукторе.

Значения коэффициентов трения, приведенные в таблице 1, занижены, практически они больше, определить их невозможно, так как они определяются путем разрушения сопряжения осевой силой или моментом, разрушить же такое соединение невозможно из-за пластических деформаций деталей, составляющих соединение.

Для выбора посадки расчетное значение минимального натяга принимается с учетом удвоенной величины шероховатости сопрягаемых поверхностей вала и охватывающей детали, предполагая, что неровности при взаимном внедрении полностью перекрываются.

При сборке с термовоздействием и с промежуточной средой - жидким стеклом (самым высоким коэффициентом сцепления), рабочий минимальный натяг будет:

$$\delta_{\min}^{раб} = \delta_{\min} + 2(R_{z1} + R_{z2}) = 0,081 \text{ мм.}$$

Этому натягу соответствует посадка

$$\Phi 180 \frac{H8(+0.063)}{t7\left(\frac{+0.186}{+0.146}\right)}.$$

Минимальный натяг – 0,083 мм, средний – 0,155 мм, максимальный – 0,186 мм.

Проверка выбранной посадки по напряженному состоянию показала, что имеется значительный запас прочности. Это видно из следующих расчетов:

Максимальный расчетный натяг будет

$$\delta_{\max.} = \delta_{\max.}^{раб} - 2(R_{z1} + R_{z2}) = 0,156 \text{ мм.}$$

Контактное давление при максимальном натяге $P_{\kappa} = 60 \text{ Н/м}^2$.

Допускаемое контактное давление по энергетической теории прочности на посадочной поверхности шестерни без учета эксплуатационных нагрузок

$$\left[P_{\kappa} \right] = 0,58 \sigma_T \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] = 382 \text{ Н/м}^2,$$

где σ_T – предел текучести, 1000 Н/м^2

Таким образом, запас прочности составляет:

$$K_{зап} = \frac{P_{\kappa.доп}}{P_{\kappa.макс}} = \frac{382}{60} = 6,36$$

Для осуществления сборки методом термовоздействия путем нагрева охватывающей детали-шестерни в индукционно нагревательной установке необходимо определить требуемую температуру (t), которая обеспечит необходимый сборочный зазор между посадочными поверхностями вала и шестерни.

При нагреве диаметр отверстия шестерни должен увеличиться на сумму величин размера максимального натяга и монтажного зазора

$$t = \frac{\delta_{\max} + \delta_{\text{монт}}}{\alpha \cdot d} + t_b$$

где $\delta_{\max} = 0,186$ мм – максимальный табличный натяг;
 $\delta_{\text{монт}} = 0,01-0,18$ мм – монтажный зазор;
 $\alpha = 11 \times 10^{-6}$ мм/гр – коэффициент линейного расширения;
 $t_b = 20$ °С – температура вала.

В нашем случае $t=205$ °С удовлетворяет условию сохранения структуры и механических свойств материала термообработанной шестерни.

Выводы

Для повышения качества изделия при проектировании конструкции крупногабаритных деталей машин, подвергающихся интенсивному износу, учитывая их значительную трудо- и материалоемкость, следует принимать во внимание технологичность их ремонта, для чего необходимо выполнить следующие условия:

- предусмотреть возможность повторного использования элементов после замены износившихся в процессе эксплуатации поверхностей, для чего проектировать деталь сборной по посадке с натягом;
- по возможности оставить открытым доступ к месту соединения для осуществления сборки и разборки с помощью индукционного нагрева, как наиболее технологичного метода сборки соединений с натягом;
- при проектировании технологических процессов сборки и разборки соединений шире использовать универсальное модульное индукционно-нагревательное оборудование, созданное по принципу агрегатирования.

Список использованных источников:

1. Андреев Г. Я. Тепловая сборка колесных пар / Г. Я. Андреев. – Харьков : Изд-во Харьковского университета, 1965. – 337 с.
2. Резервы экономии материальных ресурсов / И. Ф. Малицкий, А. А. Алехин, Т. В. Макушенко ; Укр. заочн. политехн. ин-т. – Харьков, 1986. – 5 с. – Деп. в УкрНИИТИ N 1306-УК86.
3. Лебедь В. Т. Сборка крупногабаритных изделий ответственного назначения с использованием термовоздействия / В. Т. Лебедь, Б. М. Арпентьев // Вестник национального технического университета "ХПИ". – 2009. – № 2. – С. 74-82.
4. Лебедь В. Т. Технология восстановления крупногабаритных и тяжеловесных составных изделий / В. Т. Лебедь // Вестник национального технического университета "ХПИ". – 2009. – № 1. – С. 62-70.
5. Смирнов И. П. Развитие технологии ремонта подъемно-транспортного оборудования / И. П. Смирнов // *Машинобудування* : зб. наук. праць / Укр. інж.-пед. акад. – 2009. – № 4. – С. 170-177.

References

1. Andreyev, G 1965, *Teplovaya sborka kolesnykh par*, Izdatelstvo Kharkovskogo universiteta, Kharkiv.
2. Malitskiy, I & Alekhin, A 1986, *Rezervy ekonomii materialnykh resursov*,. Ukrainskiy zaochnyy politekhnicheskiiy instiut, Kharkiv.
3. Lebed, V & Arpentyev, B 2009, 'Sborka krupnogabaritnykh izdeliy otvetstvennogo naznacheniya s ispolzovaniyem termovozdeystviya', *Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI"*, no. 2, pp. 74-82.
4. Lebed, V 2009, 'Tekhnologiya vosstanovleniya krupnogabaritnykh i tyazhelovesnykh sostavnykh izdeliy', *Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI"*, no. 1, pp. 62-70.
5. Smirnov, I 2009, 'Razvitiye tekhnologii remonta pod'yemno-transportnogo oborudovaniya', *Mashynobuduvannya*, iss. 4, pp. 170-177.

Стаття надійшла до редакції 16 червня 2016 р.