

Г. К. МАРКАРЯН, Г. А. УНАНЯН

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Одна из важных проблем современного машиностроения — повышение надежности и долговечности машин и механизмов. При этом немаловажную роль играет прочность прессовых соединений (ПС), являющихся распространенными в машиностроении.

Прессовые соединения образуются при помощи контактирования двух поверхностей — охватывающей и охватываемой за счет натяга между ними. В зависимости от величины отношения натяга к номинальному диаметру по ГОСТ 7713-62 все ПС делятся на три группы, причем считается, что легкие прессовые посадки осуществляются только за счет упругих деформаций, а усиленные и тяжелые — за счет упруго-пластических деформаций.

Однако, если исходить из реального строения рабочих поверхностей сопрягаемых деталей, в обоих случаях соединение сопровождается пластической деформацией микронеровностей за счет незначительной фактической площади касания и связанного с этим огромным давлением в точках контакта. Зона распределения этой деформации зависит от материала деталей и натяга и, очевидно, от геометрии и физико-механического состояния рабочих поверхностей. В зависимости от характера и метода осуществления ПС (со смазкой, без смазки, под прессом, с нагревом, с холодом и т. д.) и фактического натяга соединения поверхностные слои деталей оказываются в различных состояниях трения и схватывания. От протекания процесса трения и схватывания контактирующих поверхностей в покое в основном и зависит прочность ПС. Последняя при статических осевых нагрузках характеризуется тремя основными параметрами:

1. Усилием запрессовки — P_z .
2. Усилием распрессовки — P_p .
3. Отношением сил распрессовки и запрессовки — P_p/P_z .

При осуществлении ПС с применением нагрева охватывающей или охлаждением охватываемой детали прочность ПС характеризуется только усилием распрессовки P_p . Наиболее эффективным, с точки зрения схватывания контактирующих поверхностей, должно оказаться увеличение распрессовочного усилия при неизменном или уменьшенном запрессовочном усилии.

В опубликованных работах достаточно исследована зависимость

прочности ПС от макро- и микрогеометрии сопряженных поверхностей, методов осуществления ПС, остаточных напряжений, возникающих при упрочнении, методов обработки рабочих поверхностей, а также самого ПС на усталостную прочность валов и осей [3, 4, 5, 6, 7, 8, 12]. В настоящее время под влиянием состояния рабочих поверхностей на прочность ПС подразумевается влияние только их микрогеометрии. Что касается возможной зависимости прочности ПС от физико-механического состояния этих поверхностей и, в частности, от их упрочнения и остаточных напряжений, то она изучена крайне недостаточно, с противоречивыми результатами и без теоретического обоснования. Большинство же работ в этом разрезе посвящено уточнению влияния упрочнения поверхностных слоев сопряженных деталей (в основном охватываемой детали) на усталостную их прочность [6, 8].

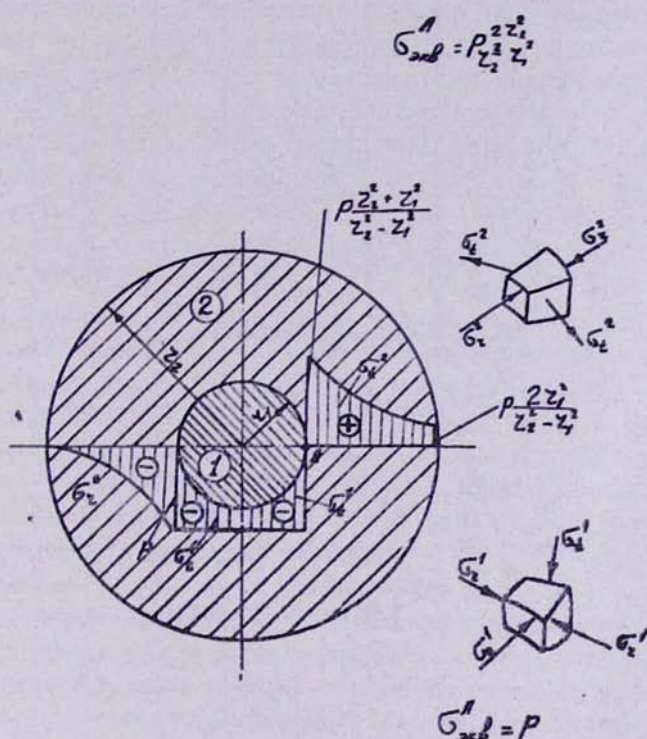


Рис. 1. Схема прессового соединения и эпюры напряжений.

Как следует из нижеприводимых соображений, упрочнение и характер распределения остаточных напряжений в поверхностных слоях должны определенным образом изменить условия контактирования поверхностей и тем самым оказать определенное влияние на прочность ПС.

Известно, что пластическая деформация сопровождается упрочнением металла, что, в частности, выявляется повышением предела текучести (без изменения модуля упругости) и твердости. Следовательно,

упрочненный металл обладает большей жесткостью и способностью воспринимать существенно большие нагрузки без образования остаточных деформаций. А отсюда — упрочнение рабочих и поверхностей может оказать двоякое влияние на прочность ПС. Повышенная жесткость приповерхностных слоев будет воспрепятствовать взаимному внедрению гребешков сопрягаемых реальных поверхностей (что особенно ощутимо при шероховатости грубее $\nabla 7$), что приводит к снижению прочности ПС. Но, с другой стороны, подобное повышение упругих свойств металла поверхности создает необходимые условия для увеличения области упругих деформаций с образованием благоприятной эпюры возникающих в соединении напряжений, что, несомненно, станет источником повышения прочности ПС.

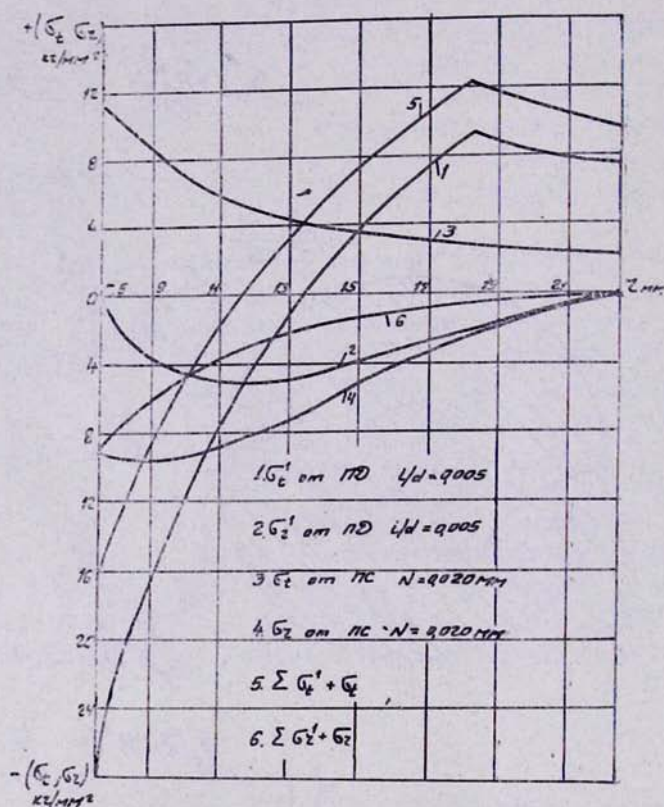


Рис. 2. Распределение радиальных σ_r и тангенциальных σ_t напряжений ПД и ПС по толщине стенки втулки.

В охватывающей детали при выполнении ПС как в тангенциальном, так и в радиальном направлении, как показывают расчеты, возникают напряжения растяжения (рис. 1) с максимальным значением у самой поверхности контакта. В охватываемой же детали в обоих направлениях образуются только сжимающие напряжения и опять-таки с макси-

мумом у поверхности контакта. Следовательно, создание в поверхностных слоях охватывающей детали при ее изготовлении сжимающих остаточных напряжений может определенным образом повысить прочность ПС за счет снижения суммарного уровня или даже их преобразования в сжимающие.

Для наглядности (рис. 2) показаны суммарные окружные (σ_t) и радиальные (σ_r) остаточные напряжения при осуществлении ПС с дорнованными втулками из материала сталь 3 (рис. 2, кривые 5 и 6). Как видно, несмотря на то, что при ПС окружные напряжения растягивающие, суммарное окружное напряжение на поверхности отверстия втулки получается сжимающим. Сжимающим является и суммарное радиальное напряжение. При больших натягах ПС ($N \geq 0,040 \div 0,050$ мм) в зоне пластических деформаций сопряженных поверхностей, вследствие увеличения величин растягивающих напряжений от ПС, суммарное напряжение может оказаться растягивающим и влияние напряженного состояния сопряженных поверхностей на прочность ПС должно уменьшаться.

Таким образом, располагая закономерностями упрочнения рабочих поверхностей и учитывая характер, особенности и условия создания ПС, можно управлять прочностью этих соединений. При этом, как следует из эпюры напряженных состояний элементов соединения, наибольший эффект можно ожидать из упрочнения рабочей поверхности именно охватывающей детали, с целью уменьшения или преобразования растягивающих тангенциальных напряжений (σ_t^2) на сжимающие.

Остаточные сжимающие напряжения, как это видно из результатов многочисленных исследований, оказывают благоприятное влияние на усталостную и коррозионную прочность, на износостойкость. А эти характеристики долговечности играют немаловажную роль в прочности ПС, если исходить из условий сопряжения деталей в микрообъемах. Как показано на рис. 1, эквивалентное напряжение в месте контакта (точка А) для охватывающей поверхности (2) всегда больше, чем для охватываемой поверхности (1). Например, при $g_2/g_1 = 1,25 \div 3$ (где g_1 — радиус охватываемой детали, g_2 — радиус охватывающей детали). $\sigma_{\text{экр}}^2/\sigma_{\text{экр}}^1 = 5,5 \div 2,25$ (по теории наибольших касательных напряжений). Следовательно, для повышения прочности и несущей способности контакта двух поверхностей необходимо в первую очередь увеличить прочность поверхностных слоев охватывающей детали. Увеличение прочности поверхностных слоев только охватываемой детали при помощи упрочнения (например, обкаткой роликами) не может увеличить прочность и несущую способность ПС, так как сопротивление к распрессовке определяется сопротивляемостью на срез и растяжение по наиболее слабым поверхностным слоям из двух трущихся поверхностей (т. е. поверхностью охватывающей детали).

Учитывая двойное влияние упрочнения на контактирование шероховатых поверхностей и исходя из вышензложенного, нами была поставлена задача установить влияние упрочненного (наклепного) и напряженного состояния контактирующих поверхностей на прочность ПС.

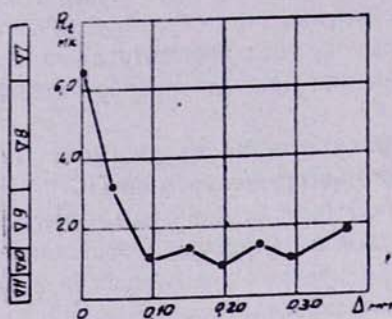


Рис. 3. Зависимость чистоты отверстий втулок от величины остаточной деформации Δ ПД.

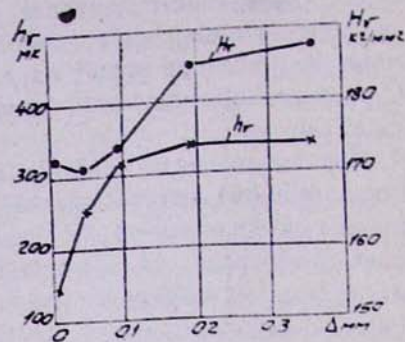


Рис. 4. Зависимость величины H_v и глубины распределения H_v микротвердости от величины остаточной деформации Δ ПД.

Для первой стадии работ задача решалась путем сравнения результатов экспериментальных прессовок и распрессовок ПС, где втулка подвергается упрочняющей обработке с различными степенями упрочнения при помощи поверхностного дорнования (ПД). В соответствии с характером задачи намечена следующая методика экспериментирования. Для получения более рельефных результатов материалом для охватывающей детали (втулки) была принята среднеуглеродистая сталь 3, имеющая сравнительно большую способность к пластическим деформациям. Материалом для охватываемой детали (валика) была принята углеродистая сталь 45. Перед механической обработкой материалы подвергались нормализации.

Для осуществления ПС было принято обычное прессование под прессом. Размер соединения был взят $\Phi 15A_3/Pr3_3$, а натяг соединения изменялся в пределах поля допуска $\delta = 0,115$ мм. Конструкция и размер деталей определялись из условия испытания на статическую прочность при осевом нагружении. Окончательная обработка отверстий во втулках перед ПД производилась протягиванием, обеспечивающим чистоту поверхностей отверстия $\nabla 7 \div \nabla 8$. Посадочные шейки всех валиков были шлифованы и имели чистоту $\nabla 8$. Для получения различной степени упрочнения, поверхностное дорнование производилось различными натягами ($i = 0,025 \div 0,45$ мм, $i/d = 0,0016 \div 0,03$) путем изменения размеров дорна. Смазка при дорновании — смесь сульфозфрезола и 10%-ного растительного масла. Дорнование производилось за один проход. С целью устранения краевого эффекта от ПД втулки после обработки подрезались с двух сторон.

Полученная шероховатость, величина микротвердости и глубина упрочнения поверхности отверстия после однократного ПД в зависимости от натяга i показаны на рис. 3, 4. Остаточные напряжения и деформации после дорнования втулок были рассчитаны по известным формулам [14]. По этим расчетным величинам были построены графики

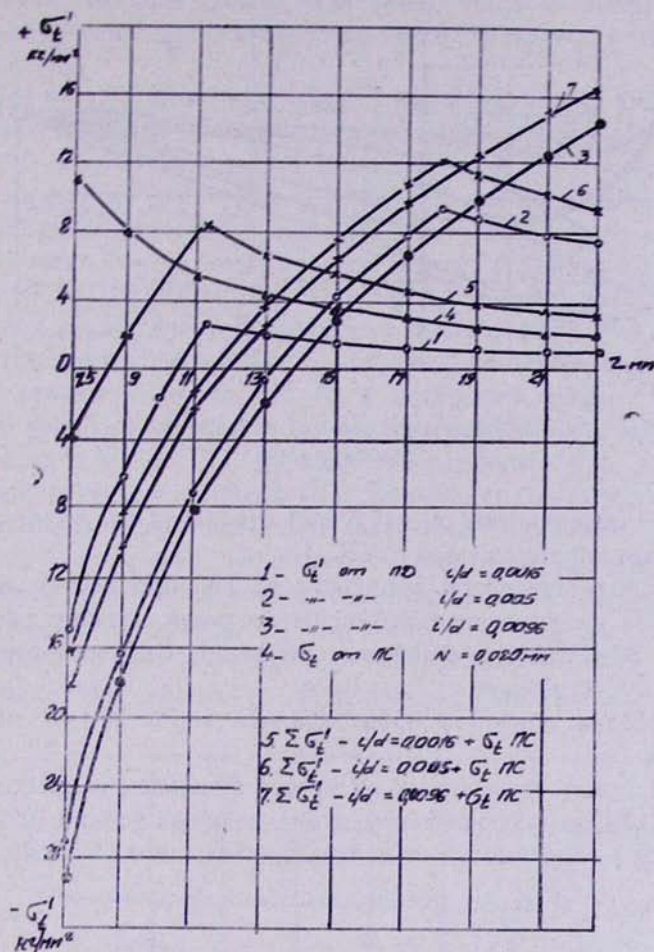


Рис. 5. Расчетная величина тангенциальных напряжений (τ_t, τ'_t) по толщине стенки втулки.

круглых (рис. 6) и радиальных (рис. 7) напряжений. Как уже отмечено [14], в периоде полной перегрузки втулки при ПД (т. е. когда в стенке втулки имеются только пластические деформации) увеличение круглых и радиальных напряжений не происходит. К этому периоду соответствует натяг ПД $i \geq 0,125$ мм ($i/d \geq 0,0083$). На рис. 5, 6 показаны также напряжения, которые возникают при осуществлении ПС для пружинной зоны (натяг $N=0,020$ мм), рассчитанные по общеизвестным формулам [13, 15], и суммарные напряжения от остаточных напряжений ПД и от напряжений ПС. Как видно, характер остаточных окружных напряжений ПД не изменяется после осуществления ПС (от сжимающих у отверстия к растягивающим у наружной поверхности втулки), а только, уменьшаясь, перемещается к внутреннему радиусу отверстия. Характер радиальных напряжений ПД после ПС изменяется, несмотря на то, что напряжение увеличивается и остается сжимающим.

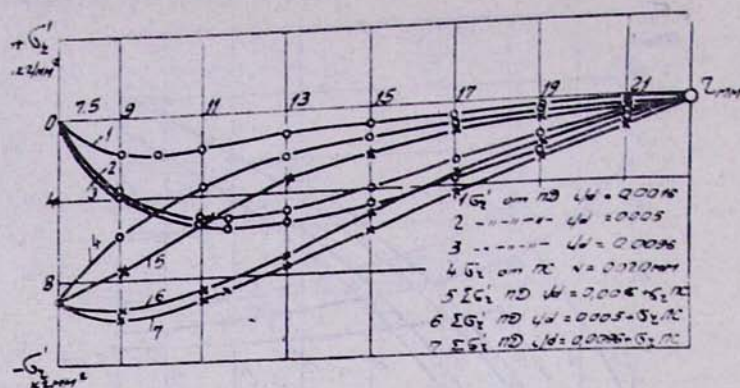


Рис. 6. Расчетные величины радиальных напряжений (σ_r, σ'_r) по толщине стенки втулки.

У внутренней поверхности ($r_1 = 7,5$ мм) отверстия оно увеличивается от нуля и равняется напряжению от ПС.

Испытания статической прочности от ПС при осевом нагружении производились на универсальной испытательной машине типа ЦДТ-300 (завод Фев Веркштофпрюфмашине, Лейпциг). Скорость запрессовки и распрессовки — 1 мм/мин.

Распрессовка образцов производилась через 30÷40 минут после запрессовки.

Идентичность записанных на прессе диаграмм запрессовки и распрессовки, характеризующих изменение величин усилий запрессовки и распрессовки в зависимости от величины взаимного смещения образцов,

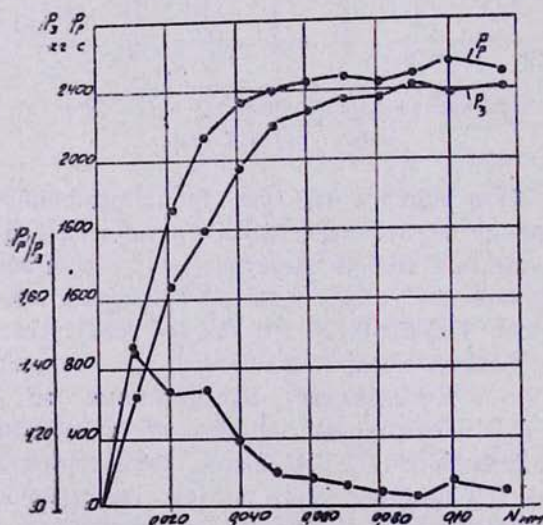


Рис. 7. Зависимость величины запрессовочной P_3 , распрессовочной P_r усилий, а также относительной прочности P_r/P_3 от величины натяга N прессового соединения.

показали, что при данном сочетании чистоты поверхностей образцов коэффициенты трения движения при запрессовке и распрессовке почти одинаковы.

По результатам исследований были построены графики (рис. 7—9), характеризующие изменение усилий запрессовки и распрессовки в зависимости от величины натяга ПС и величины остаточных деформаций отверстия втулки после ПД. Каждая точка на графиках соответствует среднеарифметическому значению результатов пяти измерений.

На рис. 7 показаны графики зависимостей усилий запрессовки и распрессовки, а также их отношений P_p/P_z от натяга соединения для втулок с протянутыми отверстиями. Величины усилий на этих графиках приняты как исходные для сравнения с величинами усилий для втулок с ПД отверстиями. На рис. 8а, б построены графики зависимостей величин усилий запрессовки и распрессовки от остаточной деформации отверстия Δ после ПД, которая нами принята как основной критерий, характеризующий процесс ПД. Как видно из результатов испытаний втулок с ПД отверстиями, прочность соединения при статических осевых усилиях значительно увеличивается, как по усилиям запрессовки и распрессовки, так и по относительной прочности в зависимости от величин остаточной деформации втулки после ПД. Сначала до значения величины остаточной деформации отверстия $\Delta = 0,1 \div 0,2$ мм увеличение прочности ПС происходит интенсивнее, после чего интенсивность значи-

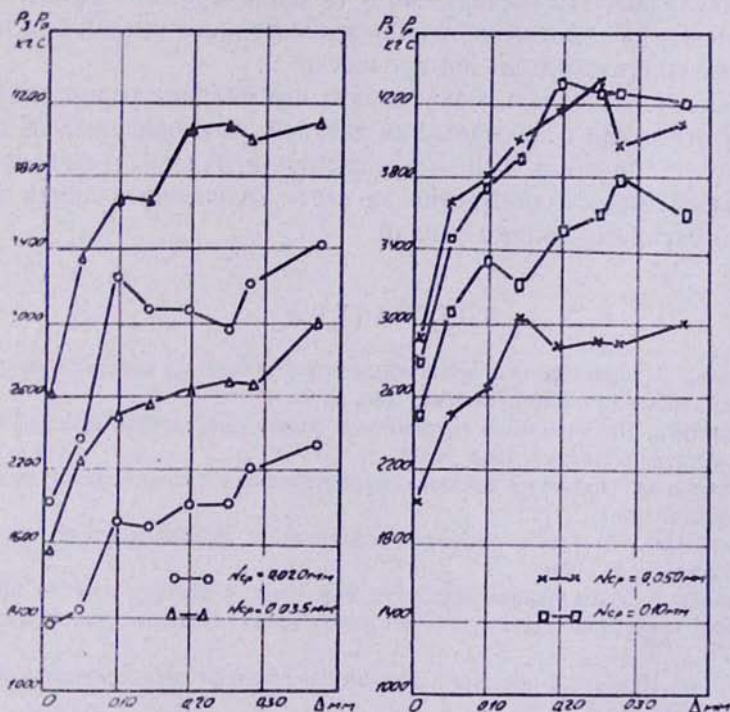


Рис. 8. Зависимость величины запрессовочной P_z и распрессовочной P_r усилий от величины остаточной деформации Δ ПД и от натяга и ПС.

тельно уменьшается. Величина $\Delta = 0,1 \div 0,2$ мм соответствует началу периода полной перегрузки втулки при ПД, после чего увеличение окружных и радиальных остаточных напряжений не происходит, а увеличение микротвердости и глубины упрочнения небольшое (рис. 4). С увеличением натяга ПС интенсивность увеличения прочности ПС, как видно, уменьшается, что было отмечено заранее (за счет уменьшения величин суммарных сжимающих остаточных напряжений). Так, если при $N = 0,020$ мм и $\Delta = 0,25$ мм, по сравнению с втулками с протянутыми отверстиями, увеличение P_3 составляет примерно 50%, увеличение P_p — 80%, а относительная прочность P_p/P_3 — 20%, то при $N = 0,10$ мм, $\Delta = 0,25$ мм увеличение P_3 составляет около 23%, P_p — 50%, а P_p/P_3 — 12,5%.

Надо отметить, что увеличение прочности ПС по сравнению с втулками с протянутыми отверстиями происходит также за счет увеличения геометрической точности (овальность, конусность) и чистоты поверхности отверстия после ПД.

Полученные результаты подтверждают, что, изменяя степень упрочнения подповерхностных слоев контактирующих поверхностей, можно изменять прочность ПС.

Из графиков (рис. 8) видно, что при увеличении величины остаточных деформаций отверстий от $\Delta = 0,010$ мм до $\Delta = 0,3$ мм, после ПД, прочность ПС увеличивается на 45%—65% (в зависимости от натяга ПС) за счет увеличения распрессовочного и запрессовочного усилий при практически неизменной относительной прочности.

Полученные результаты показывают, что наличие упрочнения в поверхностях отверстий охватывающих деталей, изготовленных из среднеуглеродистой стали сталь 3, может повысить прочность и несущую способность неподвижных соединений за счет увеличения величин запрессовочного и распрессовочного усилий.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Б. Корона. Влияние чистоты посадочных поверхностей на прочность сопряжений с натягом. «Станки и инструменты», 1950, № 9.
2. А. М. Димитров. Нормирование погрешности формы для деталей прессовых соединений. «Стандартизация», 1964, № 12.
3. Г. А. Бобровиков. Прочность посадок осуществляемых с применением холода. М., «Машиностроение», 1971.
4. Г. И. Лукашевич. Прочность прессовых соединений с гальваническими покрытиями, Киев. Гостехиздат, 1961.
5. Б. М. Ружицкий. Исследование прочности прессовых и горячих посадок при пульсирующих кручениях. «Известия Киевского политехнического института», т. 24, 1957.
6. М. М. Кобрин. Прочность прессовых соединений при повторно-переменной нагрузке. Машгиз, 1954.
7. С. В. Серенсен. Прочность валов и осей в связи с запрессовкой деталей. Сб. «Исследование в области машиноведения», М., Изд. АН СССР, 1944.
8. Н. П. Зобнин. Качество обработанных поверхностей и прочность прессовых соединений осей. Труды МЭМИИТ, вып. 58. Трансжелдориздат.

9. Н. П. Зобнин. «Вестник машиностроения», 1952, № 3.
10. Н. П. Зобнин. «Вестник машиностроения», 1951, № 8.
11. М. М. Кобрия. «Вестник машиностроения», 1952, № 3.
12. Н. В. Кудряцев, Н. М. Саввина. Использование остаточных напряжений для повышения прочности валов с неподвижными посадками. М., 1956.
13. Е. И. Берникер. Посадки с натягом в машиностроении. М., «Машиностроение», 1966.
14. Ю. Г. Проскурников. Дорнрование отверстий. М.—Свердловск. Машгиз, 1961.
15. С. Д. Пономарев и др. Расчеты прочности в машиностроении, т. II, М., Машгиз, 1958.
16. В. Я. Ариссон. Прессование посадки в сопряжениях малых диаметров. «Прогрессивная технология приборостроения», сб. 3, Машгиз, 1951.
17. И. В. Крагельский. Трение покоя 2-х шероховатых поверхностей. «Известия АН СССР», ОТН № 10, 1948, стр. 1621—1625.