

ПРОФІЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ ІНДЕНТОРА ДЛЯ КОМБІНОВАНОГО ЗМІЦНЮВАЛЬНО-ВИГЛАДЖУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ З УРАХУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВКИ

В статті проведено дослідження процесу деформування металу в ході вигладжувального оброблення. Виявлено, що застосування інденторів, які мають лінійний контакт з деталлю, для вигладжування з поздовжньою подачею вимагає застосування заходів, що знімають концентрацію напружень на периферії відбитка, протилежній від напрямку подачі, через те, що в цьому місці припиняється контакт деталі з інструментом і остаточно формується оброблена поверхня.

Ключові слова: вигладжування, індентор, профілювання, епюри, градієнт напружень

В статье проведено исследование процесса деформирования металла в процессе выглаживающей обработки. Обнаружено, что применение инденторов, которые имеют линейный контакт с деталью, для выглаживания с продольной подачей требует принятия мер, снижающих концентрацию напряжений на периферии отпечатка, противоположной от направления подачи, потому, что в этом месте прекращается контакт детали с инструментом и окончательно формируется обработанная поверхность.

Ключевые слова: выглаживание, индентор, профилирование эпюры, градиент напряжений

The paper studied the process of deformation of the metal in the process of smoothing processing. It has been found that the use of an indenter which have line contact with the workpiece for smoothing longitudinal feed requires measures relieving stress concentration at the periphery of the print opposite from the feeding direction, because the place is terminated the contact parts with the instrument and finally formed surface treated.

Keywords: smoothing, indenter, shaping diagrams, stress gradient

Постановка проблеми. Після попереднього оброблення деталей обертання (токарного або шліфувального) на їх поверхнях, з'являються поздовжня хвилястість різної висоти і кроку та відхилення від круглості, які носять випадковий характер. Ці явища виникають внаслідок збурень, що діють на технологічну систему (ТС), яка в даному випадку розглядається як коливальна система з одним ступенем вільності. При визначених співвідношеннях швидкості оброблення, значень окремих характеристик збурень (амплітуда, частота), параметрів ТС (маса рухомих частин, жорсткість інструменту) порушується технологічна стабільність процесу оброблення (спостерігається відрив індентора та його удари по оброблюваній поверхні).

Аналіз останніх досліджень. Стабільність процесу оброблення комбінованого вигладжування (КВ), з точки зору технології машинобудування, характеризується забезпеченням параметрів якості оброблюваної поверхні в регламентованих межах з високою надійністю. З цього критерію впливає одна з головних вимог до процесу: теоретично, сила впливу індентора на оброблювану поверхню повинна бути сталою і відповідати встановленій величині, а на практиці не виходити за допустимі межі відносно номіналу [1, 4].

Формування цілей дослідження. Деформування металу в ході вигладжувального оброблення починається з втискання індентора в поверхню деталі. Початковий контакт індентора з деталлю може бути точковим або лінійним – в залежності від конфігурації індентора та заготовки. Під дією докладеної сили P_y , індентор втискається в заготовку, залишаючи на її поверхні відбиток, форма якого відіграє важливу роль у подальшому процесі пластичного деформування.

Виклад основного матеріалу. Відбиток еліптичної форми утворюється під час оброблення деталей типу тіло обертання, індентором сферичного профілю, якщо радіус його кривизни не дорівнює радіусу кривизни деталі, взятому з оберненим знаком. Індентори з робочим профілем, що описуються в осьовому перерізі колом, тобто виготовлені у формі тора, бочки або сфери (зокрема, кульки), мають переваги, які забезпечують їх широке застосування у виробничій практиці. Під час їх використання постійна форма відбитка зберігається незалежно від точності установки індентора та жорсткості системи: верстат – інструмент – деталь. Індентори сферичного профілю широко використовуються у викінчувальному обробленні та служать основним інструментом зміцнювального оброблення. Прямокутний відбиток утворюється у випадку лінійного вихідного контакту індентора з деталлю. Умовою утворення лінійного контакту служить рівність абсолютних величин кривизни профілю індентора та деталі. Наприклад, лінійний контакт мають циліндрична деталь з індентором прямолінійного профілю при паралельних твірних, галтель та тороподібний

індентор – при рівних за абсолютною величиною радіусах кривизни. Прямокутний відбиток створює найкращі умови для деформації в процесі оброблення без поздовжньої подачі коротких поверхонь, коли ширина індентора перекриває довжину оброблюваної ділянки.

Застосування інденторів, які мають лінійний контакт з деталлю, для вигладжування з поздовжньою подачею вимагає застосування заходів, що знімають концентрацію напружень на периферії відбитка, протилежній від напрямку подачі, через те, що в цьому місці припиняється контакт деталі з інструментом і остаточно формується оброблена поверхня. На рис. 1 наведено епюри розподілу контактної тиску інденторами різної форми.

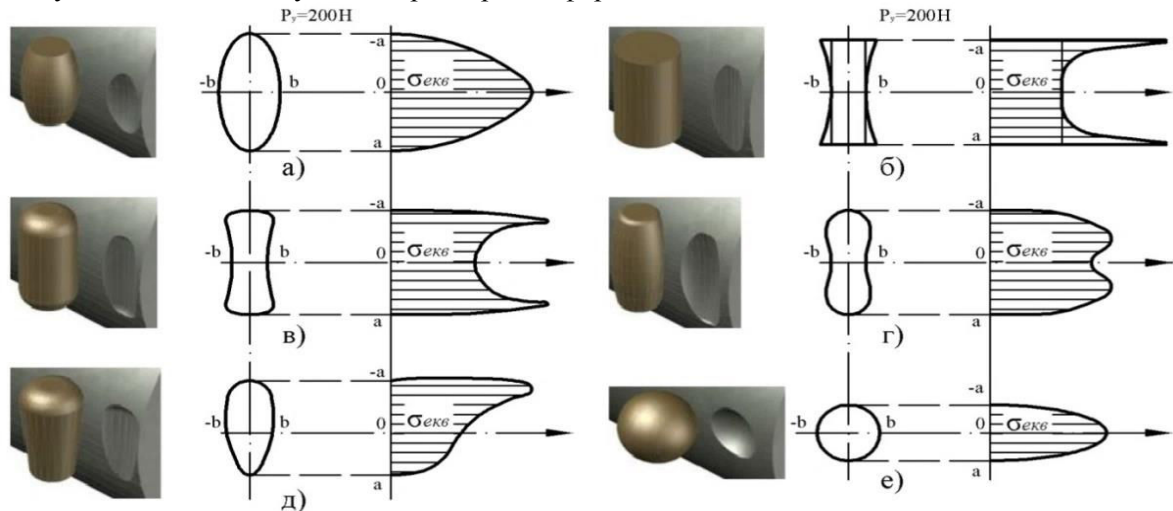


Рис. 1. Епюри розподілу контактної тиску інденторами різної форми: а – при точковому початковому контакті індентора круглого профілю; б – при лінійному початковому контакті циліндричного індентора з прямокутним спряженням твірної з торцями; в – при лінійному початковому контакті циліндричного індентора з радіусними спряженнями, при відношенні довжини циліндричної ділянки до округлення 0,9; г – при лінійному початковому контакті циліндричного індентора з радіусними спряженнями, при відношенні довжини циліндричної ділянки до округлення 0,4; д – при каплеподібному відбиткові; е – при сферичному відбиткові

Напружений стан, в якому індентор і деталь знаходяться під дією робочих сил, залежить від їх пружних характеристик і геометричної конфігурації поверхні контакту, що утворилася в результаті пластичного деформування деталі. При точковому початковому контакті, який під дією навантаження перетворюється в еліптичний, теорія Герца [4] допускає розподіл контактної тиску по еліпсоїді з максимальним тиском в центрі (рис. 1 а):

$$P_{y \max} = \frac{3P_y}{2\pi ab}, \quad (1)$$

де P_y – сила притискання; a , b – півосі еліптичного контакту в осьовому та поперечному перерізах відповідно.

Утворення пластичного відбитка, призводить до значного збільшення розмірів контакту, але в силу пружного відновлення деталі, після зняття навантаження P_y початковий контакт залишається точковим. Кут втискання індентора під час вигладжування не перевищує 10° . У відповідності до даних робіт Штаермана І.Я. [4], для дослідження такого контакту підходить теорія Герца. У випадку лінійного початкового контакту двох циліндричних поверхонь просторова епюра тиску представляє собою еліптичний циліндр з максимумом в осьовому перерізі (рис. 1 б):

$$P_{y \max} = \frac{P_y}{\pi ab}. \quad (2)$$

Але теорія Герца у випадку лінійного контакту визначає напружений стан у точках, віддалених від периферії (контакт нескінченної довжини). При обмеженій довжині контакту тиск можна визначити, зробивши припущення, що напружений стан в осьовому перерізі є плоским [2, 4]:

$$P_y(x) = \frac{P_y}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}}. \quad (3)$$

Біля периферії індентора, яка має нульовий радіус кривизни, тиск прямує до нескінченності (рис. 1 б). При кінцевій кривизні округленого профілю індентора, біля торців концентрація напружень зменшується. Чим більшу частину довжини контакту займають округлені ділянки, тим в більшому ступені знижується концентрація напружень (рис. 1 в). Якщо рухатись далі за цією

методикою, то можна побудувати профіль індентора, який буде створювати в умовах пружного контакту заданого епюром тиску, а саме $P_y(x)=\text{const}$. Передуюча стабілізованій пружній взаємодії пластична деформація деталі має значний вплив на реальну епюру контактних напружень, головним чином за рахунок спотворення кривизни поверхні в граничних зонах. На краю пластичного відбитка кривизна деталі може досягати значної величини, що призводить до відповідного росту концентрації напружень та до більш інтенсивного деформування периферії відбитка. В результаті на обробленій поверхні залишається слід від подачі S індентора та виникають дефекти, пов'язані з коливанням величини подачі. Радикальним способом боротьби з небажаними концентраціями напружень є обмеження кута втискання індентора в осьовому перерізі. Це досягається завдяки збільшенню радіуса кривизни, обмеженням робочого зусилля P_y або встановленням індентора під певним фіксованим кутом до поверхні, яка оброблюється (рис. 1 д), при цьому відбиток набуває краплеподібної форми, яка звужується в протилежну сторону від напрямку вектора обертання деталі. Формула Хейфеца С.Г. [3] дає змогу розрахувати глибину h_σ поширення пластичної деформації як функції сили P_y втискання індентора та межі текучості σ_T деформованого матеріалу:

$$h_\sigma = \sqrt{\frac{P_y}{2\sigma_T}} \quad (4)$$

Ця формула, отримана в результаті розв'язання задачі Буссінеска, вона більш точна для відносно малих глибин зміцнення, її вирішення засноване на аналізі кругового пружного контакту за Герцом, дає результати, близькі до експериментальних. При цьому слід мати на увазі, що в роботі [2] аналізується пружний стан деталі без урахування пластичної деформації при напруженнях, які переважають межу текучості матеріалу. Приймаючи таку розрахункову схему, наближену до реальності, варто пам'ятати, що при виникненні пластичних деформацій в безпосередньому сусідстві з межею, що відокремлює зону пластичних деформацій від зони пружних деформацій, буде відбуватися перерозподіл залишкових напружень $\pm\sigma_{\text{зал}}$.

Слід зазначити, що формула (4) справедлива для контакту невеликої площі, який має форму, близьку до круглої, зокрема, еліптичну. Після завершення пластичної деформації індентор і заготовка знаходяться в напруженому стані, який врівноважує докладену зовнішню силу P_y (рис. 2 б). При цьому напружений стан деталі в контакт з індентором визначається не вихідною (рис. 2 а), як це приймали раніше, а пластично деформованою у результаті втискування формою її поверхні.

Після зняття навантаження індентор набуває початкового положення, а на деталі залишається відбиток (рис. 2 в), форма і розміри якого залежать від геометричної конфігурації контактуючих тіл до втискування і від твердості матеріалу деталі. Напружений стан деталі буде відновлено при повторному навантаженні індентора силою P_y . Перевищення її призводить до додаткової пластичної деформації поверхні та до збільшення розмірів контакту до тих пір, поки новий напружений стан не врівноважить знову докладену силу P_y . Таким чином, під час розрахунку напружень, що виникають у деталі, повинна братися до уваги не тільки вихідна, а й нова кривизна пластично деформованої поверхні.

По мірі протікання деформації максимум межі текучості зростає і поглиблюється до тих пір, поки не досягне положення, яке відповідатиме максимуму навантаження. У процесі вимірювання твердості металу в поперечному перерізі поверхневого шару зазвичай фіксується саме цей результат, причому точка вирівнювання твердості визначає межу пластично деформованого шару, тобто глибину зміцнення h_σ . Отже, в загальному випадку контакту тіл довільної кривизни головні напруження σ_x , σ_y , σ_z , на площинах, перпендикулярних до осей, з яких z нормаль до поверхні контакту, а x співпадає з головною віссю еліптичної контактної зони, визначаються формулами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -P_y \frac{\frac{b}{a}}{1 - \frac{b^2}{a^2}} \left\{ -\sqrt{\frac{\frac{b^2}{a^2} + \frac{z^2}{a^2}}{1 + \frac{z^2}{a^2}}} + 2\frac{z}{a}(L-K) - 2\mu \left[1 - \frac{a^2}{b^2} \sqrt{\frac{\frac{b^2}{a^2} + \frac{z^2}{a^2}}{1 + \frac{z^2}{a^2}}} + \frac{z}{a} \left(\frac{a^2}{b^2} L - K \right) \right] \right\}; \\ \sigma_y &= -P_y \frac{\frac{b}{a}}{1 - \frac{b^2}{a^2}} \left\{ \frac{1 + \frac{z^2}{a^2} \left(2\frac{a^2}{b^2} - 1 \right)}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}} \sqrt{\frac{b^2}{a^2} + \frac{z^2}{a^2}}} - 2\frac{z}{a} \left(\frac{a^2}{b^2} L - K \right) - 1 + 2\mu \left[1 - \sqrt{\frac{\frac{b^2}{a^2} - \frac{z^2}{a^2}}{1 + \frac{z^2}{a^2}}} + \frac{z}{a} (L-K) \right] \right\}; \\ \sigma_z &= -P_y \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}} \sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}}}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Головні напруження тут виражено як функції відношення півосей b та a відбитка, відношення координати z залягання досліджуваної точки до півосей еліпса та найбільшого тиску P_y в центрі зони контакту. У формулі (5) для σ_x, σ_y фігурують коефіцієнти Пуассона μ та еліптичні інтеграли першого

$$K(e, \theta) = \int_0^\theta \frac{d\theta}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \theta}} \text{ та другого роду } L(e, \theta) = \int_0^\theta \sqrt{1-e^2 \sin^2 \theta} d\theta, \text{ які залежать від параметра}$$

$$\theta = \operatorname{arccotg} \frac{z}{a} \text{ та ексцентриситету еліпса } e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}.$$

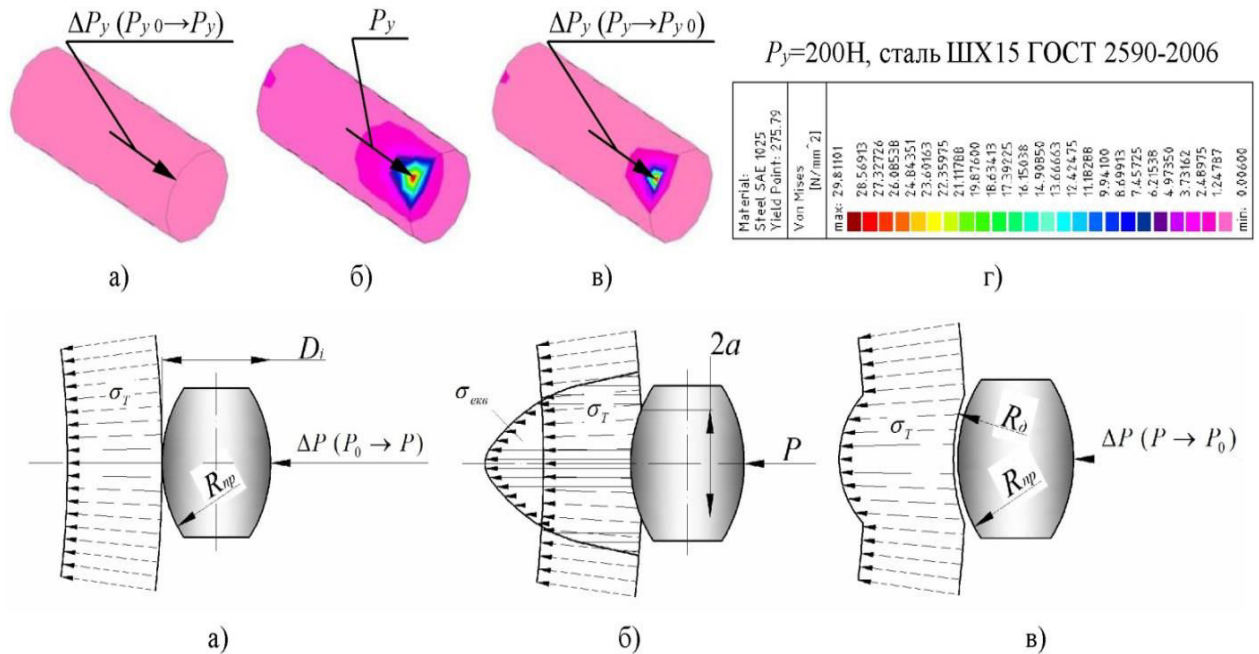


Рис. 2. Схеми контакту індентора та заготовки: а – перед початком втискання; б – під деформуючим навантаженням $P_y=200$ Н; в – після зняття навантаження; г – градієнт напружень

Для сталі ШХ15 ГОСТ 2590-2006 коефіцієнт Пуассона $\mu=0,3$, звідси можна визначити для ряду значень b/a та z/b головні напруження (5) і еквівалентне напруження (6):

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]}. \quad (6)$$

Після прирівнювання, згідно з гіпотезою Губера-Мізера, середніх дотичних напружень $\sigma_{екв}$ до межі текучості матеріалу деталі в початковому стані, знайдено координату $z=h_\sigma$ межі пластично деформованого шару. Враховуючи те, що під час пружного контакту тіл з кінцевими радіусами кривизни $R_{шп}$ найбільший тиск в центрі відбитка визначається згідно з формулою (1), отримуємо:

$$\sigma_T = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_y}{\pi a b} \sqrt{\frac{1}{2 P_y^3} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]}. \quad (7)$$

Позначивши корінь через A , справедливим буде наступне рівняння: $P_y/ab\sigma_T=2/3 \cdot \pi/A$. Тут A , це $\sigma_{екв}$ при $P_y=1$. На рис. 3 показані залежності $P_y/ab\sigma_T$ та t/b для різних співвідношень півосей еліпса b/a .

Товщина пластично деформованого шару визначається за заданими величинами P_y, σ_T відношенням b/a , що залежить від початкової кривизни заготовки та індентора (рис. 1), і за реальними розмірами пластичного відбитку, безпосередньо розрахованими за формулами

$$a = \frac{1,413}{\sqrt{HB}} P_y^{0,435} D^{0,13}; \quad b = \frac{0,83}{\sqrt{HB}} \cdot \frac{\left(\frac{b}{a} P_y\right)^{0,435}}{\left[\frac{a}{b} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R}\right) + \frac{2}{D_p} + \frac{2}{D_i}\right]},$$

які характеризують реальний пружний

контакт індентора та деталі.

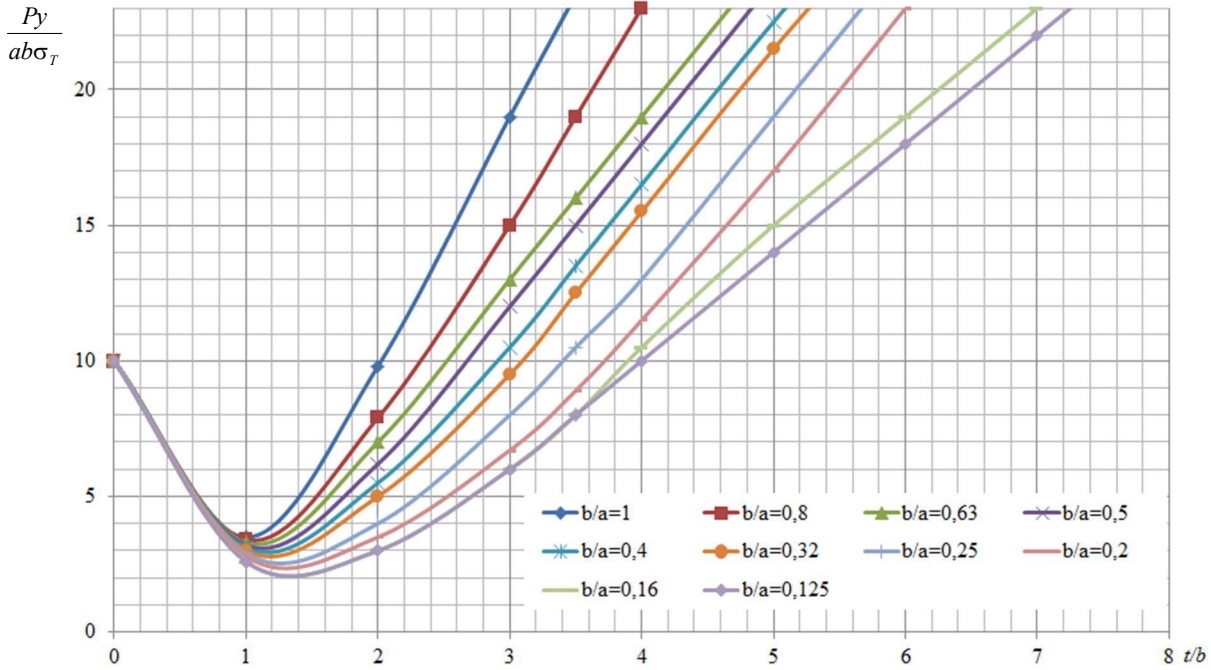


Рис. 3. Залежність $P_y/ab\sigma_T$ та t/b для різних співвідношень півосей еліпса b/a

Висновки. Під час огляду літературних джерел та аналізу виробничого досвіду встановлено критерій забезпечення регламентованої якості параметрів поверхневого шару, який полягає в тому, що теоретично, сила впливу індентора на оброблювану поверхню повинна бути сталою і відповідати встановленій величині, а на практиці не виходити за допустимі межі відносно номіналу.

Розглянуто варіанти використання інденторів різної геометричної конфігурації та досліджено параметри розподілу пружно-деформованого стану внаслідок їх застосування, виявлено, що основний вплив на формування фізико-механічних та мікрогеометричних параметрів поверхневого шару здійснює співвідношення горизонтальної до вертикальної осі профілю індентора a/b . На основі цього, розроблено методикою профілювання геометричної конструкції деформуючого елемента.

Згідно з цією методикою підібрано найбільш оптимальний геометричний профіль індентора для розробленого пристосування, який створює сприятливі умови для стабільного протікання процесу зміцнювального оброблення, з точки зору поширення залишкових напружень та утворення пружно-деформованого стану в деталі.

1. Ткачук А.А. Пат. 76846 Україна, МПК В24В 39/00 (2013.01). Спосіб зміцнюючої обробки деталей машин за допомогою тіла обертання / А.А. Ткачук, С.А. Мороз, С.О. Приступа; Заявник і патентовласник: Луцький національний технічний університет, Луцьк; заявл. 09.12.2011; опубл. 25.01.2013; Бюл. №2. – 4 с.

2. Улашкин А.П. Выбор отделочно-упрочняющих методов обработки (для повышения износостойкости деталей машин). – Хабаровск: Изд-во Хабар, гос. техн. ун-та, 1998. – 103 с.

3. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. – М.: Изд-во «Наука», 1975. – 344 с.

4. Штаерман И.Я. Контактная задача теории упругости. – М.: Гостехиздат, 1949. – 270 с.