

11. КОНЦЕНТРАЦИЈА НА НАПОНИТЕ

Повеќето машински делови имаат променлив напречен пресек. На пример, вратилото обично има степенести промени на пречникот за да може да се потпрат лежишта, запченици и др. На вратилото може да има жлебови за да се сместат клинови, усочници или отвори во кои се прицврстуваат други делови. Секоја од овие промени на геометријата на ќе предизвика локална концентрација на напоните. *Како резултат на концентрацијата на напоните, се добиваат значително поголеми локални напони од очекуваните.*

Концентратор на напоните е секој дисконтинуитет на геометријата кој предизвикува попречување на рамномерниот на тек на силите низ материјалот на делот, поради што се јавуваат дополнителни локални напони. Инженерот треба да знае каде може да се јави концентрација на напоните, како и да знае што треба да стори за да се намали штетното дејство на оваа појава.

На сл. 11.1 се прикажани три плочки оптоварени на затегнување со три вида концентратори на напони. Напонската состојба во плочките е добиена со програм за 2Д-анализа по методот на конечни елементи. Со вектори се прикажани насоките и интензитетите на главните напони кои се јавуваат во плочките. Преку насоките на главните напони може да се следи текот на силите низ делот.

На сл. 11.1а, е прикажана плочка со жлеб од едната страна. Напонот во коренот на жлебот во овој случај е повеќе од четири пати поголем отколку напонот на затегнување во плочката под жлебот. Кај плочката со отвор на средина се јавува концентрација на напоните од 2.7 пати во највисоката и најниската точка на отворот. Спротивно, лево и десно во близина на отворот се јавува намалување на напоните скоро за една половина. Концентрација на напоните се јавува и при нагла промена на широчината на плочката, како на сл. 11.1в. Во овој случај, најдено е зголемување на напоните од околу 1.8 пати во однос на напоните на потесниот крај од плочката.

На сл. 11.2 со изонапонски полиња се прикажани напоните во запченик, пресметани со помош на 2Д анализа по методот на конечни елементи. Најголемите напони се јавуваат на местото на дејство на силата, а големи напони се јавуваат и кај радиусите во коренот на забецот. Текот на силите е нормален на изонапонските линии.

Интензитетот на концентрацијата на напоните се одредува со коефициентот на концентрација на напоните α_K . Вредноста на коефициентот на концентрација на напоните α_K зависи од геометријата и димензиите на концентраторот и од видот на напрегањето. Максималните нормални напони σ_{max} и максималните тангенцијални напони τ_{max} кои ги предизвикува концентраторот се пресметуваат според равенката:

$$\sigma_{max} = \alpha_K \cdot \sigma_{nom} \quad (11.1)$$

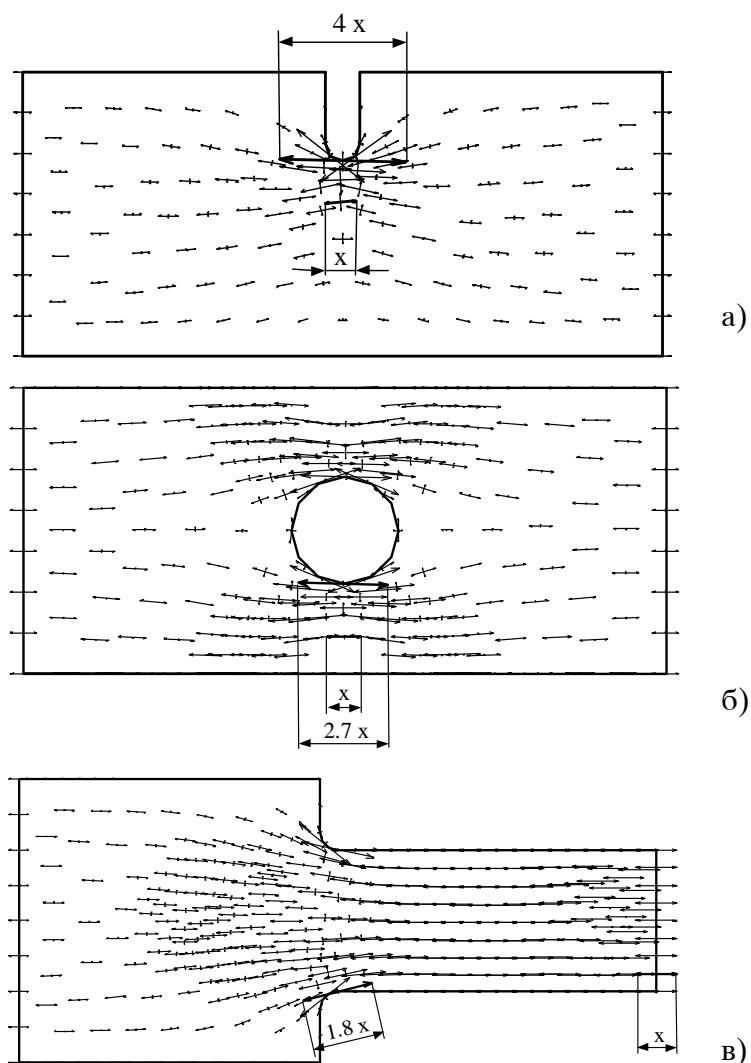
$$\tau_{max} = \alpha_K \cdot \tau_{nom} \quad (11.2)$$

каде што σ_{nom} и τ_{nom} се номиналните работни напони пресметани за дадените надворешни товари и според напречниот пресек на местото на

концентраторот. Така на пример, за примерот на сл. 11.1в номиналниот напон се пресметува за пресекот на местото на радиусот на заоблувањето, кој е еднаков со пресекот на десната половина од делот. Кај делот на сл. 11.1а, номиналниот напон се пресметува според пресекот на местото на коренот на жлебот.

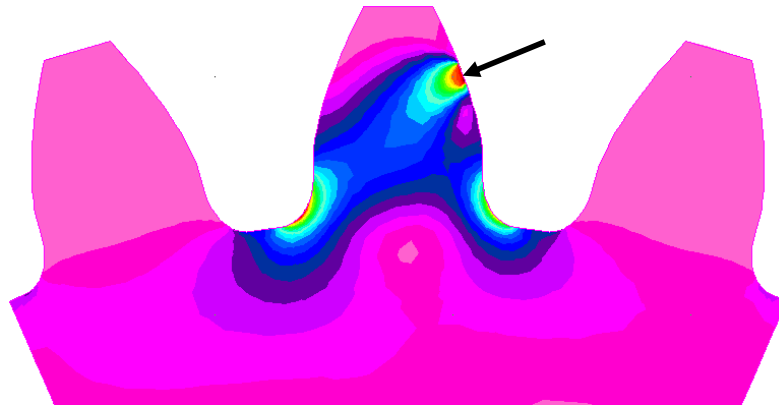
Коефициентот на концентрација на напоните α_K за поедноставните облици на концентратори на напоните може да се одреди со примена на теоријата на еластичноста, но во повеќето случаи, коефициентот на концентрација на напоните се одредува експериментално. Во поново време, за одредување на коефициентот на концентрација на напоните се користи и методот на конечни елементи, при што треба да се усвои доволно прецизна мрежа на местата на концентрација а напоните за да се добијат веродостојни резултати.

Дијаграмите за α_K за пет вида концентратори на напони се дадени во табелите на сл. 11.3 до сл. 11.14. Дијаграмите се однесуваат на три вида на оптоварување, затегнување, свиткување и усукување.



Сл.11.1. Главни напони кај илочка со ири вида концентрайтори на напони

Коефициентот на концентрација на напоните го одредува само дополнителното зголемување на напоните кое што се јавува поради геометријата на делот. Коефициентот на концентрација на напоните треба да се корегира зависно од видот на материјалот и неговата осетливост на концентратори. Осетливоста на концентрација на напоните зависи и од тоа дали оптоварувањето е статичко или динамичко.



Сл. 11.2. Напони во забец од зайченик прикажани со изонапонски полиња

11.1. Концентрација на напоните при статичко оптоварување

Кај *жилавите материјали*, на местото на концентрација на напоните се јавува локално течење на материјалот, додека останатиот дел од напречниот пресек останува оптоварен под границата на развлекување на материјалот. При локалното развлекување на материјалот, неговиот дијаграм сила-деформација станува нелинеарен, односно скоро рамен, што го прави материјалот локално неосетлив, односно не се јавува дополнителен пораст на напоните во материјалот. Понатамошното зголемување на напоните во делот ќе предизвика зголемување на зоната на развлекување на материјалот. До лом на делот ќе дојде дури кога напоните во целиот напречен пресек ќе ја надминат границата на развлекување и ќе ја достигнат границата на кинење.

Поради ваквото однесување на жилавите материјали, кај статички оптоварените делови не треба да се земе предвид концентрацијата на напоните. Потребно е само да се пресметаат напоните во најопасниот пресек и спрема тие напони да се димензионира делот. Притоа мора да се земе предвид намалувањето на површината на напречниот пресек и промената на отпорните моменти на местата каде има концентратор (жлеб, отвор и сл.).

Кај *кртните материјали* не се јавува локално течење на материјалот, бидејќи овие материјали немаат зона на пластични деформации. Кога локалните напони на местото на концентраторот ќе ја надминат јакоста на кинење, се јавува локална пукнатина, која дејствува како уште посилен концентратор и бргу се шири. Делот се крши за кратко време по појавата на локалната пукнатина. Поради тоа, кај деловите направени од крти материјали мора да се земе предвид концентрацијата на

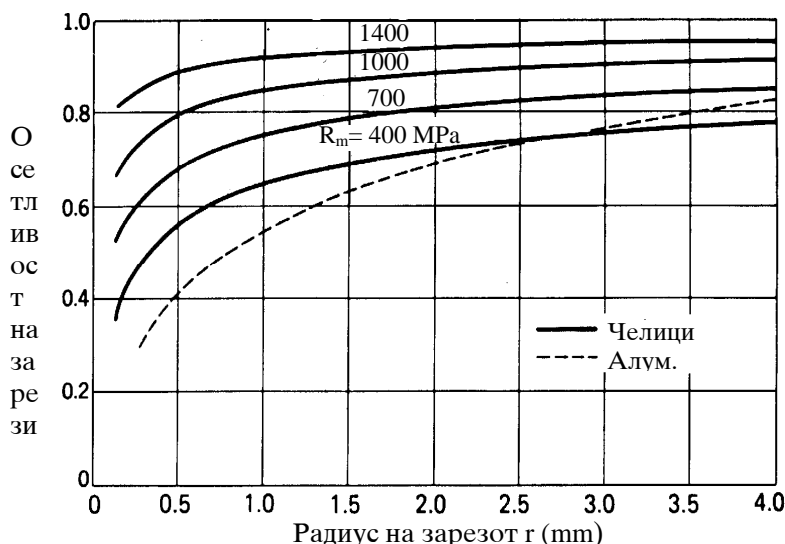
напоните, за да се зголеми соодветно пресекот и да не дојде до појава на напони блиски до границата на кинење.

Исклучок од ова правило се кртите материјали добиени со леење, кои самите содржат внатрешни пикнатини и дисконтинуитети на материјалот поради графитните уклучуци или поради воздушни меурчиња, песок и слично. Овие дисконтинуитети и неметални уклучоци се присутни во материјалот и при одредување на неговата јачина на кинење, така што нивното влијание веќе е земено предвид. Поради тоа, може да се смета дека вредностите за јачина на кинење за леаните жезеза и за други нехомогени материјали во себе веќе ја содржат корекцијата заради концентрација на напоните. Сепак, кај похомогените крти материјали мора да се земе предвид влијанието на концентрацијата на напоните при статичко оптоварување.

11.2. Концентрација на напоните при динамичко оптоварување

При динамичко оптоварување, и жилавите и кртите материјали се скоро подеднакво осетливи на концентрација на напоните. Поради тоа, при димензионирање на делови изложени на динамичко оптоварување, мора да се земе предвид влијанието на концентрацијата на напоните.

Сите материјали не се еднакво осетливи на концентрација на напоните. Осетливоста на концентрација на напоните се нарекува уште *осетливост на зарези* и се означува со q . На сл. 11.15 е прикажан дијаграм од кој се отчитуваат вредности на коефициентот на осетливост на зарези q за челици со различна јачина на кинење R_m . Општо земено, меките материјали со ниска јачина на кинење се помалку осетливи на зарези од тврдите материјали со висока јачина на кинење. Осетливоста на материјалот благо зависи и од радиусот на зарезот.



Сл. 11.15. Осетливост на зарези за челици и алуминиумски леѓури

Од дијаграмите може да се забележи дека при многу мали радиуси на зарезот се намалува осетливоста на материјалот, што претставува олеснителна околност, бидејќи кај малите радиуси факторот на концентрација на напоните нагло расте. Кога не би постоел феноменот

на намалена оселивост на материјалите на тесни зарези, деловите не би можеле да издржат ни најмало оптоварување при присуство на макар и најмала пукнатина.

Кај динамички оптоварените делови се прави модификација на коефициентите за концентрација на напоните така што се зема предвид и осетливоста на материјалот на зарези. Коефициентот на концентрација на напоните при динамичко оптоварување β_K се пресметува врз основа на статичкиот коефициент на концентрација α_K и осетливоста на материјалот на зарези q , според равенката:

$$\beta_K = 1 + q(\alpha_K - 1) \quad (11.3)$$

Максималните напони при динамичко оптоварување се пресметуваат така што номиналните напони при динамичко оптоварување се множат со коефициентот β_K при што се земаат вредности за α_K од дијаграмите на сл.1.3 до 1.14 зависно од видот на напрегањето на кои е изложен делот.

$$\sigma_{max} = \beta_K \cdot \sigma_{nom} \quad (11.4)$$

$$\tau_{max} = \beta_K \cdot \tau_{nom} \quad (11.5)$$

Ако вредноста за q во равенката 11.3 се земе 1, се добива еднаков фактор на концентрација на напоните за статичко и за динамичко оптоварување. Коефициентот на концентрација на напоните при динамичко оптоварување β_K е нешто помал од коефициентот на концентрација при статичко оптоварување α_K , така што ако наместо β_K во равенките 11.4 и 11.5 се земе директно вредност за α_K , би се направило извесно прецизирање.

11.3. Конструктивни зафати за намалување на концентрацијата на напоните

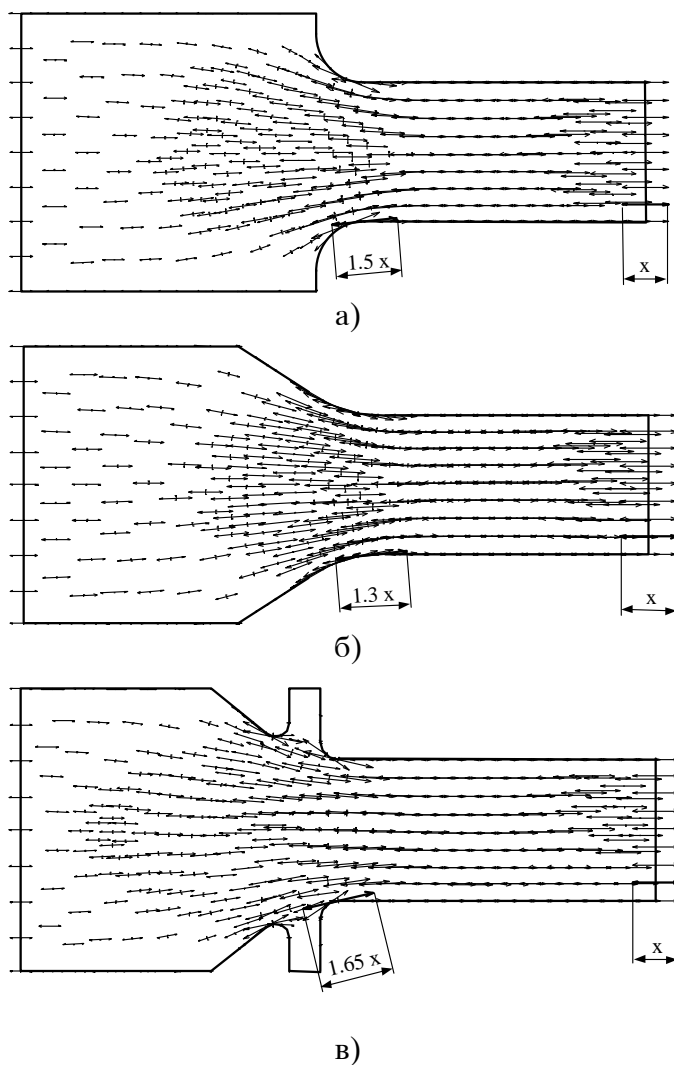
Кај машинските делови со сложен облик не може да се избегне појавата на концентрација на напоните. Тоа што може да го направи конструкторот е да ја ублажи оваа појава. Со анализа на дијаграмите за коефициентите на концентрација, може да се заклучи дека поголема концентрација на напоните се јавува при помали радиуси на заоблување и при поголеми скокови на напречниот пресек. На пример, коефициентот на концентрација на напоните кај степенеста цилиндрична прачка е поголем при поголеми вредности на односот на дијаметрите D/d и при помали односи на радиусот и дијаметарот r/d .

Некои општи правила за намалување на концентрацијата на напоните се:

- по можност треба да се одбегнуваат нагли промени на напречниот пресек,
- треба целосно да се избегнуваат остри агли и треба да се предвиди најголем можен радиус на премин помеѓу различни напречни пресеци,

- оптоварените делови кои се изработуваат од цврсти и крти материјали треба да се конструираат така што да бидат без или со минимална концентрација на напоните.

Во случај кога овие правила не може сосема да се применат, треба добро да се диманзионираат деловите и да се користат поживави материјали. На сл. 1.16 се прикажани неколку начини за намалување на концентрацијата на напоните. Во првиот случај е зголемен радиусот на заоблување, во вториот случај е направен благ премин со доста голем радиус и во третиот случај е направен жлеб позади степенцијата. Кај сите овие облици се забележува помала концентрација на напоните во критичните пресеци отколку на сл.1.1в.



Сл. 11.16. Намалување на концентрацијата на напоните со: поголем радиус (а), благ премин (б) и жлеб (в)

Еден од начините за намалување на концентрацијата на напоните е поставувањето на дополнителни жлебови како на сл.1.16в, кои придонесуваат за помало или за поблаго скршување на напонските линии.

Кога дел изложен на свиткување има концентратори на напони, треба да се прегледа дијаграмот на моменти и да се провери дали концентраторите се наоѓаат во подрачје со интензивни моменти на свиткување. Концентраторите на напони поставени во зоните на високи моменти на свиткување се многу опасни. Ако не може да се избегнат концентраторите на напони, тогаш конструкторот треба да се обиде да го намали нивното влијание со нивно поместување или со промена на должините на делот.

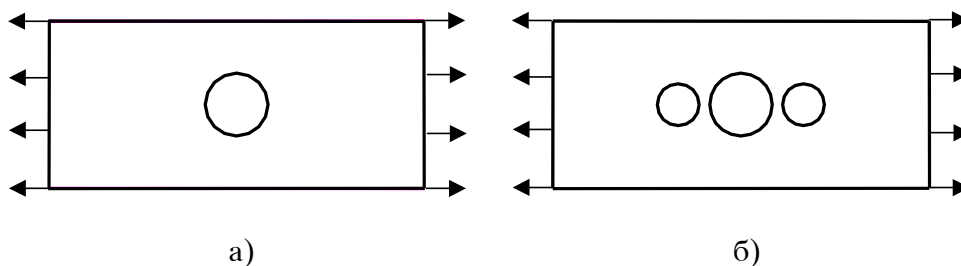
Задача:

Плочата на сл. 1.17а е со димензии 90x40 mm и има дебелина 10 mm. Отворот во средината е со дијаметар 15 mm. Долж покусите страни, плочата е оптоварена на истегнување под дејство на сила од 10^4 N, која е рамномерно распределена по површината. Силата на единица должина во прикажаната проекција изнесува $10000:40 = 250$ N/mm. Плочата е направена од челик со јачина на кинење 225 N/mm².

а) Пресметајте ги номиналните напони во плочата на местото на најмалиот напречен пресек. Потоа отчитајте ја од табела вредноста за концентрација на напоните и пресметајте ги максималните напони.

б) Пресметајте ги максималните напони во плочата по методот на конечни елементи и споредете го резултатот со претходно добиената вредност според класичната пресметка.

в) На плочата може да и се додадат два помали отвора, еден налево и еден надесно од централниот отвор. Отворите се со дијаметар 10 mm и се поставени симетрично на меѓусебно растојание 30 mm (сл. 11.17б). Одредете ја големината на максималните напони за овој случај. Згуснете ја мрежата околу отворите за да се добијат поточни резултати. За колку проценти се намалуваат максималните напони кај средишниот отвор?



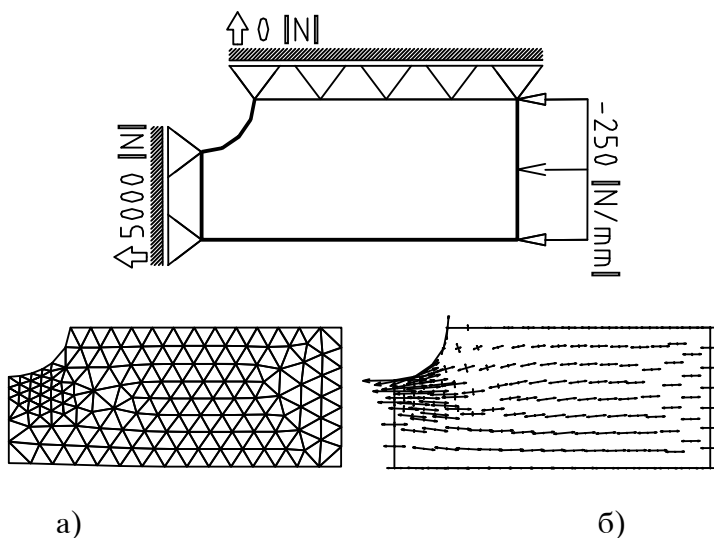
Сл. 11.17. Плочка со отвор на средината (а) и со додатни отвори за намалување на концентрацијата на напоните (б)

Решение:

а) Површината на најмалиот напречен пресек изнесува $A = (40-15) \cdot 10 = 250$ mm². Интензитетот на номиналниот напон во овој пресек изнесува $\sigma_{nom} = F/A = 10000/250 = 40$ N/mm². Односот на ширината на плочата и дијаметарот на отворот изнесува $d/W = 15/40 = 0.375$, така што од дијаграмот на сл. 11.12 се отчитува вредноста за $\alpha_K = 2.27$. Максималниот напон изнесува $\sigma_{max} = \alpha_K \cdot \sigma_{nom} = 2.28 \cdot 40 = 91.2$ N/mm².

б) Плочата е двојно симетрична и доволно е да се анализира само една четвртина. Нацртајте една четвртина од плочата со помош на

програмот AutoCAD Mechanical Power Pack како на сл. 1.17а. Отстранетите делови од плочата се заменуваат со подвижна потпора по целата должина. Со помош на наредбата FEA2D внесете ја силата и потпорите и одредете ги главните напони во рамнина по методот на конечни елементи.



Сл. 11.18. Плочка со отвор на средината (а) и со додајни отвори за намалување на концентрирацијата на напоните (б)

Ако се земе големина на конечните елементи да биде 3 и не се зададе згуснување на мрежата, се добива максимален напон 85.2 N/mm^2 . Овој резултат е за околу 7% помал од напоните добиени при класичната пресметка.

Ако се зададе автоматско згуснување на мрежата се добива максимален напон од $89,0 \text{ N/mm}^2$. Ако се зададе автоматско згуснување на мрежата 2x се добива максимален напон од $90,5 \text{ N/mm}^2$, а за згуснување од 5x се добива резултат $90,8 \text{ N/mm}^2$. Во овој случај пресметаните напони се помали за 2,5% до 0.4% од напоните добиени по класичната пресметка.

Ако се зададе рачно згуснување на мрежата 3x за точката каде се јавуваат најголеми напони се добива резултат 91.9 N/mm^2 . Ако се зададе рачно згуснување на мрежата 5x за точката каде се јавуваат најголеми напони се добива резултат 91.6 N/mm^2 , а за зголемување од 10x се добива резултат 91.4 N/mm^2 . При овој начин, добиените напони се 0.7% до 0.2% поголеми од напоните добиени по класичната пресметка.

в) На сл. 11.19 се прикажани резултатите добиени за плочката од сл. 11.17б. Основната големина на конечните елементи е 3. При автоматско згуснување на мрежата се добива максимален напон $80,1 \text{ N/mm}^2$, при 2x згуснување на мрежата со правоаголник околу отворите се добива резултат $82,9 \text{ N/mm}^2$. При споредба со резултатите добиени на сличен начин во претходниот пример, може да се заклучи дека намалувањето на максималниот напон поради додатните отвори изнадува околу 11%.