

## ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА КОНТАКТНА УМОРА НА МАТЕРИАЛ С ПОВЪРХНОСТНО УЯКЧЕН СЛОЙ

Татяна Авджиева

[avdjieva@vtu.bg](mailto:avdjieva@vtu.bg)

ВТУ “Т. Каблешков”  
“Гео Милев”158, София, България

**Ключови думи:** *контактна умора, тангенциални напрежения, твърдост, подобряване, индукционно закаляване, йонно азотиране, нитроцементация*

**Резюме:** *В тази разработка се прави опит за намиране на обяснение за контактнo-уморния живот на стомана 38Cr2NiMoV след различни уякчаващи обработки. На база задълбочен литературен анализ и извършени теоретико-експериментални изследвания е направена хипотеза, че колкото по-голяма е дълбочината на екстремума на тангенциалните напрежения, толкова якостта на контактна умора е по-висока. За потвърждаване на тази хипотеза е направен послоен анализ на напреженията (нормални и тангенциални) в пробни тела от средно въглеродна стомана под действие на контактни натоварвания. Пробните тела предварително са подобрени – закалени от 840°C във вода и след това отвърнати при 650°C, след което са подложени на различни повърхностно уякчаващи обработки – индукционно закаляване, йонно азотиране и нитроцементиране.*

### ВЪВЕДЕНИЕ

Обект на изследване са пробни тела от средно въглеродна стомана 38Cr2NiMoV (химичен състав в табл. 1). Всички пробни тела след механичната им обработка бяха подложени на закаляване от 850 °C във вода, след това на отвърщане при 650 °C (60 мин.) и впоследствие охладени с пещта. След термичната обработка пробните тела бяха фино шлифовани до грапавост Ra = 0,82 μm (Ra – средноаритметично отклонение на профила). Механичните характеристики на стоманата след тази обработка (подобряване) са посочени в таблица 2.

**Таблица 1. Химичен състав**

Стомана марка	C,	Cr,	Ni,	Mn,	Si,	Mo,	V,	P,
	Мас. %							
(38CrNiMoV)	0,44	1,88	1,27	0,75	0,28	0,18	0,16	0,021

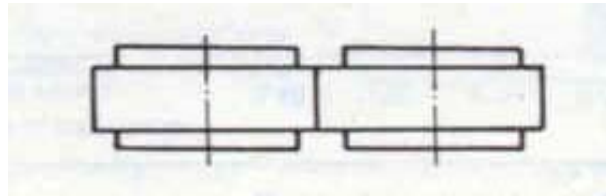
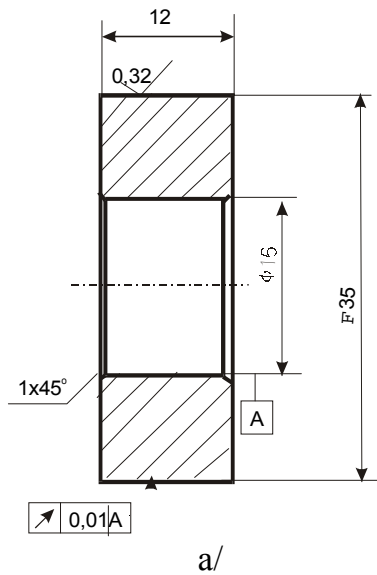
**Таблица 2. Механични свойства на стоманата след подобряване**

Стомана марка	R <sub>0,2</sub> , N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>	A <sub>5</sub> , %	Z, %	KCV, J/cm <sup>2</sup>
(38CrNiMoV)	805	965	19	54	54,38498

След подобряването, с цел определяне на параметрите на умора на стоманата след различни методи на повърхностно уякчаване, определен брой пробни тела бяха подложени на индукционно закаляване, йонно азотиране и нитроцементиране:

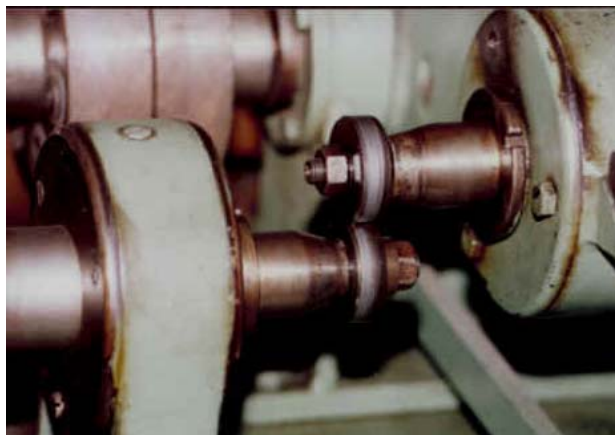
1. Повърхностно закаляване с индукционно нагриване (т.в.ч.) при честота на тока 65 kHz, време за закаляване – 105 - 110 s, аноден ток 70 A, катоден ток - 1,8 A, скорост на подаване - 1,5 mm/s. Зъбните колела от тяговия редуктор на локомотив по документация трябва да са с дълбочина на слоя от 1,2 до 1,8 милиметра, поради което бе избран и посоченият режим на закаляване.
2. Йонно азотиране при 530 °C в среда от H<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> = 1 : 3 (5, 8 часа). По данни на Furbaheг [116] това е препоръчителен режим за йонно азотиране на средновъглеродни стомани, легирани с Cr-Ni-Mo-V с цел повишаване на контактната им якост на умора.
3. Йонно азотиране при 530 °C в среда от амоняк (8 часа).
4. Нитроцементация в течна среда от KCNO и KCN ( NaNO<sub>2</sub> NH<sub>4</sub>Cl) при 570°C (9 часа). Методът е избран съгласно данни на британската асоциация на инженерите по зъбни колела (British Gear Assosiation) [136].

Контактно уморните изпитания са проведени чрез имитиране на контактното натоварване на активните повърхности на зъба посредством ролковата аналогия. Пробните тела (фиг.1) са цилиндрични ролки с работна ширина 12 mm и диаметър 35 mm при контактуване в режим на търкаляне с относително приплъзване 5 %, адекватно на средната стойност на приплъзването в околуполусната зона на зъбното зацепване. По време на изпитването се прилага смазване с трансмисионно масло EP 80.



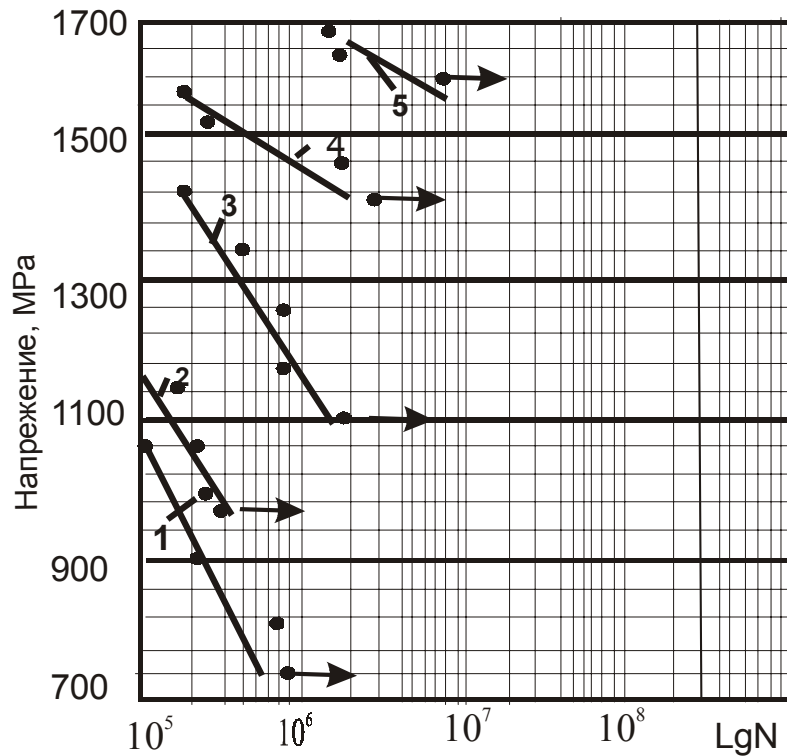
Фиг. 1. Пробно тяло за изпитване на контактна умора – а/ вид на пробното тяло; б/ схема на контакт

За изпитване на контактна умора е използвана еднопозиционна двуролкова машина тип “Amsler” (фиг.2) при режим на работа: честота на въртене на диска  $n = 80 - 850 \text{ min}^{-1}$ , натоварване  $P = 180 - 2000 \text{ N}$ , електродвигател с мощност  $N = 1,0/1,5 \text{ kW}$ ,  $n = 750/1420 \text{ min}^{-1}$ .



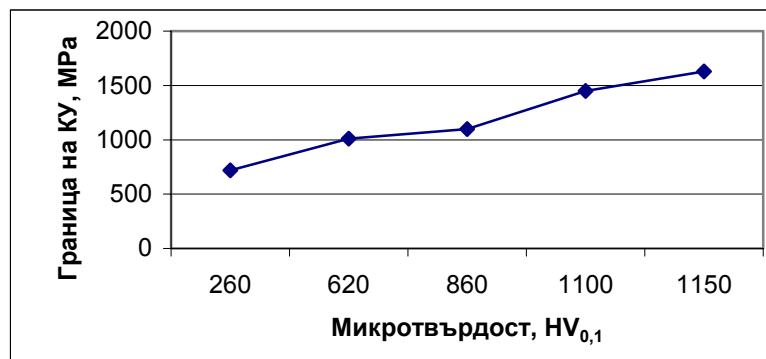
Фиг.2. Машина за изпитване на контактна умора тип “Амслер”

В резултат на проведени експерименти бе установено, че якостта на умора на стомана 38Cr2NiMoV се увеличава в резултат на уякчаване на повърхността на материала вследствие на провеждане на различни термични и химико термични обработки. Това увеличение е различно в зависимост от вида на обработката. При контактното натоварване най-голямо увеличение на границата на умора спрямо тази на неуякчената стомана (след подобряване) се установява при нитроцементация – 100 %, при йонно азотиране увеличението е до 70 %, съответно при индукционното закаляване увеличението е с 40 % (фиг.3).



Фиг.3. Криви на Вюлер при контактна умора: 1/ подобряване, 2/ индукционно закаляване, 3/ йонно азотиране ( $\delta \approx 170 \mu\text{m}$ ), 4/ йонно азотиране ( $\delta \approx 220 \mu\text{m}$ ) и 5/ нитроцементация ( $\delta \approx 270 \mu\text{m}$ )

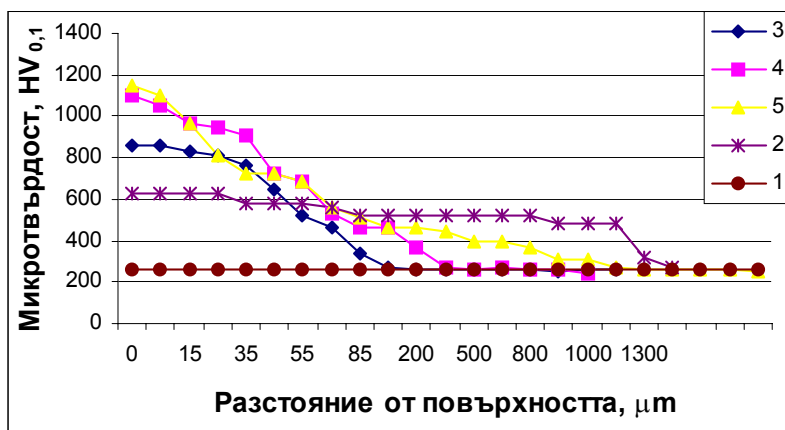
От фиг.4 може да се проследи влиянието на твърдостта върху контактната якост на материала. С увеличаване на повърхностната твърдост, постигната чрез различни термични обработки се увеличава границата на контактна умора на материала. По литературни сведения [1, 2, 3, 4] уморният живот на стоманата при контактна умора е в пряка зависимост от разпределението и стойността на максималните контактни напрежения в мястото на контакт. Фактически характеристиките на контакта, в частност и  $\tau_{\text{max}}$  (максимални тангенциални напрежения) зависят от много фактори и параметри. В пространствения обем на това множество в [5] се изказва мнението, че твърдостта на материал с хомогенна твърдост (изразена чрез средното натоварване на контактната площадка), може реално да описва сложната хиперповърхност от всички влияещи фактори. Дали това е така и при наличие на профил на твърдостта в повърхността на материала?



Фиг.4. Влияние на повърхностната твърдост върху границата на контактна умора

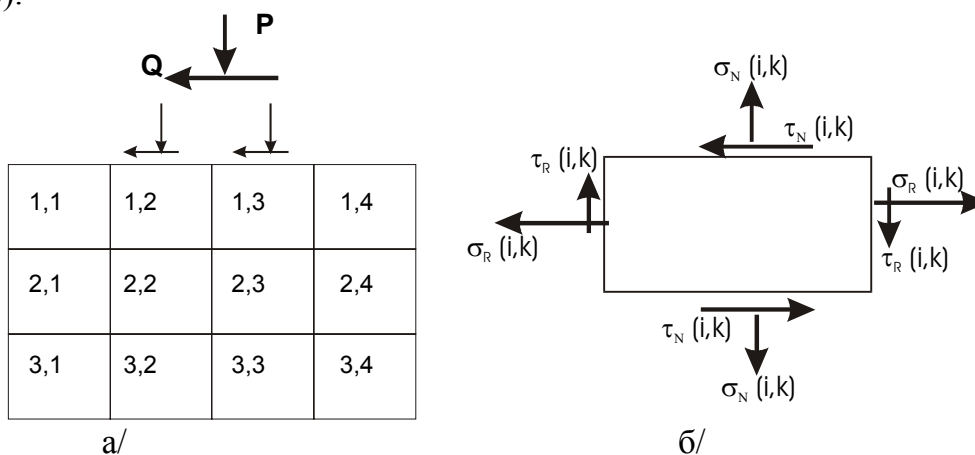
## СЪЩНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Тъй като се изследват повърхностно уякчени слоеве, в които твърдостта се намалява от повърхността към сърцевината (фиг. 5), бе направен опит за послойно изчисляване на разпределението на нормалните и тангенциалните напрежения в областта под контакта, чрез методите на механиката на непрекъснатата среда (послоен анализ).



Фиг.5. Микротвърдост на уякчените слоеве: 1/ индукционно закаляване, 2/ йонно азотиране ( $\delta \approx 170 \mu\text{m}$ ), 3/ йонно азотиране ( $\delta \approx 220 \mu\text{m}$ ) и 4/ нитроцементация ( $\delta \approx 270 \mu\text{m}$ )

Решава се задача за равновесие на напрежения, намиращи се под контактния товар, послойно в дълбочина и по повърхността на материала (фиг.6).



Фиг. 6. Слоеви под контактния товар (а) и равновесие на силите в един елемент от слоя (б)

За извеждане на уравнения за нормални и тангенциални напрежения (формули 1 и 2), възникващи във всеки елемент, се използва законът на Хук и равновесието на енергиите, чрез които се определя и нарастването на напреженията във всеки последователен слой. Разпределението на моментите се пренебрегва, тъй като приносът им в равновесието на елемента е незначителен.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{N(i+1,k)} &= \sigma_{N(i,k)} + \Delta X_{(i,k)} \\ \sigma_{R(i+1,k)} &= \sigma_{R(i,k)} + \Delta X_{(i,k)} \\ \tau_{(i+1,k)} &= \tau_{(i,k)} - \Delta X_{(i,k)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

където:

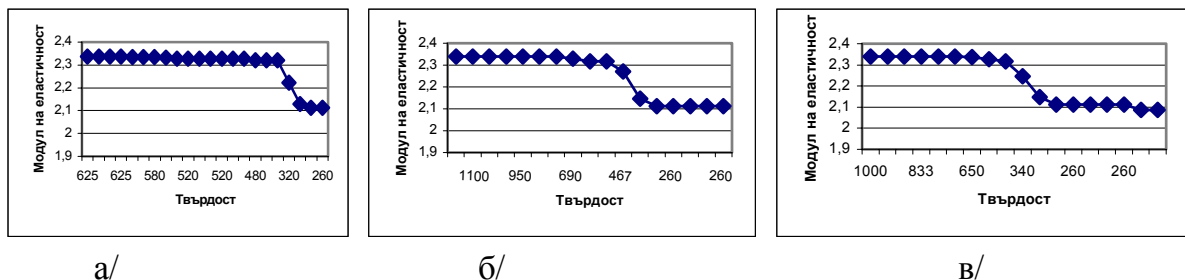
$$\left. \begin{aligned} \Delta X_{(i,k)} &= -\frac{G^*_{(i,k)}}{E_{(i,k)}} (\sigma_{N(i,k)} + \sigma_{R(i,k)}) + \frac{G^*_{(i,k)}}{G_{(i,k)}} \tau_{(i,k)} \\ \frac{1}{G^*} &= \frac{1}{E^*} + \frac{1}{G} \\ \frac{1}{E^*} &= \frac{1+\nu}{E} \\ \frac{1}{E'} &= \frac{(1-\nu^2)}{E} \\ \frac{1}{E''} &= \frac{\nu(\nu+1)}{E} \\ \frac{1}{E_I} &= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{E'} + \frac{1}{E^*} - \frac{1}{E''} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

където  $E$  – модул на еластичност,  $\nu$  – коефициент на Поасон,  $G$  – модул на напречна еластичност.

Тъй като материалът е уякчен и се наблюдава изменение на твърдостта от повърхността към сърцевината, бе направено допускането, че настъпва и промяна на модула на еластичност на материала. Според изследвания на френски учени [6] и на лабораторията по дефектоскопия при БАН [7] увеличението на модула на еластичност на материала от повърхността на стоманата след повърхностно уякчаване е не повече от 10 %, в частност за азотирани стомани това увеличение е 3 %, а за индукционно закалени – до 5 %. Чрез прилагане на хиперболоиден тангенс (формула 3) и установяване на коефициенти на зависимост бе намерена функцията на модула на еластичност ( $E$ ) от разпределението на твърдостта ( $HV$ ) в дълбочина на слоя (фиг. 7).

$$E = n \cdot \tanh(HV/m) \quad (3),$$

където  $n$  и  $m$  са коефициенти на корелация, изведени за всеки вид обработка по отделно,  $E$  е полученият модул на еластичност в зависимост от твърдостта в слоя,  $HV$  е стойността на микротвърдостта на съответната дълбочина от слоя.



Фиг. 7. Зависимост на модула на еластичност  $E$  от разпределението на микротвърдостта в дълбочина на слоя: а/ индукционно закаляване, б/ йонно азотиране, в/ нитроцементация

Установено бе, че изменението на модула на еластичност е в много малки граници – в десетичния знак след запетайката – променя се от  $2,11 \cdot 10^5$  до стойност  $2,31 \cdot 10^5$  Pa. Независимо от това, бяха направени пресмятания за разпределението на напреженията в слоя с отчитане на променящия се модул на еластичност по формули (2) и разпределение на  $E$  в съответния слой, съгласно фиг. 7.

Разпределението на нормалните и тангенциалните напрежения в уякчените слоеве може да се проследи в таблица 3.

Таблица 3. Разпределение на напреженията в уякчения слой

N	Вид обработка	$\sigma_N$	$\tau$
1	Индукционно закаляване		
2	Йонно азотиране		
3	Йонно азотиране		
4	Нитроцементиране		

По литературни данни е известно, че пукнатината в контактно натоварени материали се развива по механизъм I и II (на опън и на срязване), което предполага прилагането на два критерия за умора на твърдо еластично тяло. Ако  $\tau$  е максималната амплитуда на тангенциалните напрежения на границата между мислените тънки слоеве, а  $\sigma_N$  е съответното нормално напрежение, то  $\tau_f$  е границата на умора на материала, когато се образува пукнатина на срязване (пукнатина тип II) и  $\sigma_f$  – граница на умора, когато се образува пукнатина от тип I, т.е. разрушаване настъпва при определен брой цикли, когато максималното

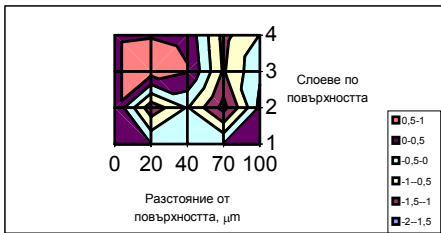
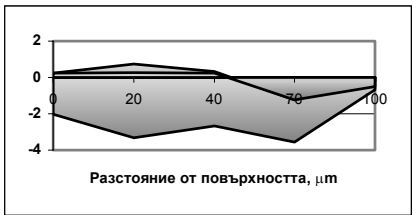

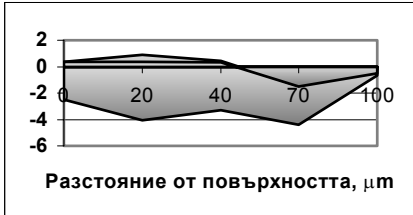
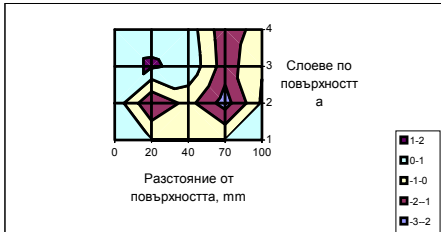
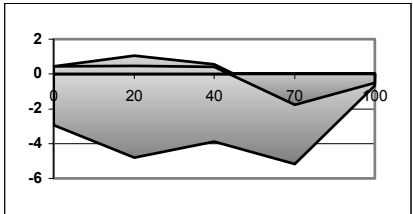
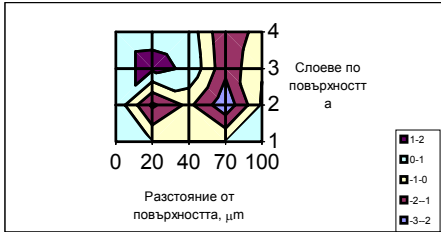
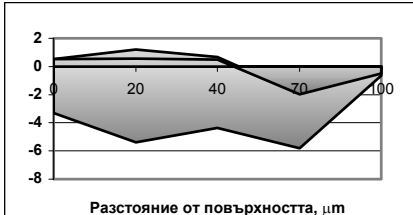
тангенциално напрежение, увеличено от нормалното, действащо в равнината на максималното тангенциално напрежение достига стойност 1 [8]. При тези полагания бяха направени проверки по критерий на срязване (формула 3) и по комбиниран линеен критерий (формула 4).

$$\frac{\tau_N}{\tau_f} \leq 1 \quad (3),$$

$$\frac{\tau_N}{\tau_f} + \frac{\sigma_N}{\sigma_f} = 1 \quad (4).$$

Резултатите от тези проверки в графичен вид са показани в таблица 4.

Таблица 4. Критерии за умора

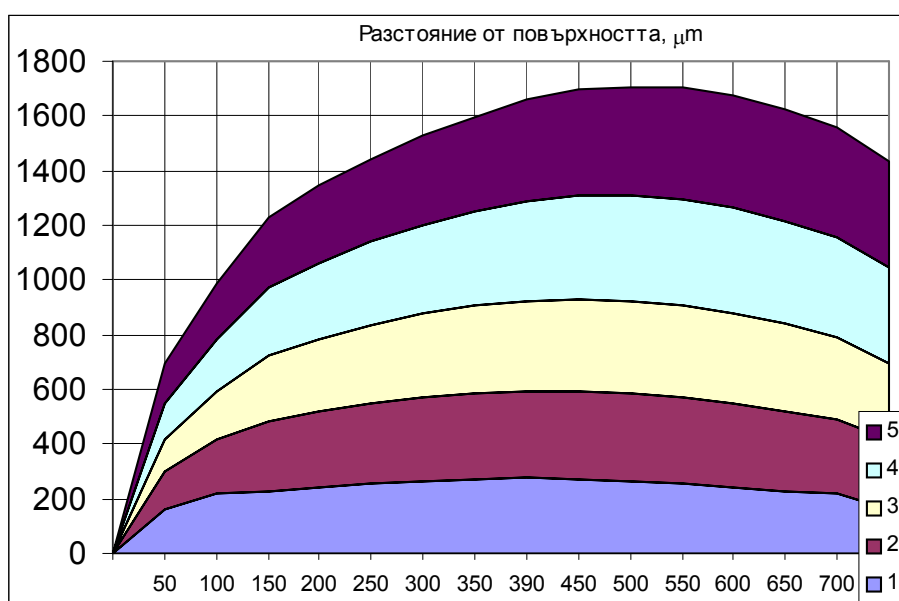
№	Метод на обработка	Критерий на срязване	Комбиниран линеен критерий
1	Индукционно закаляване		
2	Йонно азотиране		
3	Йонно азотиране		
4.	Нитроцементиране		

От анализа на получените резултати (табл.4) се установява, че и по двата критерия пукнатината се заражда при:

- Индукционно закаляване - на границата между слой (1,3) и (2,3), което отговаря на приблизителна дълбочина 20 микрона;
- Йонно азотиране – на границата между слой (1,3) и (2,3), което отговаря на приблизителна дълбочина 20 – 25 микрона;
- Йонно азотиране – на границата между слой (2,3) и (3,3), което отговаря на приблизителна дълбочина 30 микрона;
- Нитроцементация - на границата между слой (2,3) и (3,3), което отговаря на приблизителна дълбочина 30 - 35 микрона;

## АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

От направените изследвания се установява, че върху положението на максималните тангенциални напрежения  $z_t$  в уякчения слой влияят разпределението на твърдостта и дълбочината на уякчения слой  $\delta$  (фиг. 8).



Фиг. 8. Влияние на метода на обработка (съгласно табл.3. – 1 до 5) върху стойността и разпределението на  $\tau_{max}$  в уякчения слой

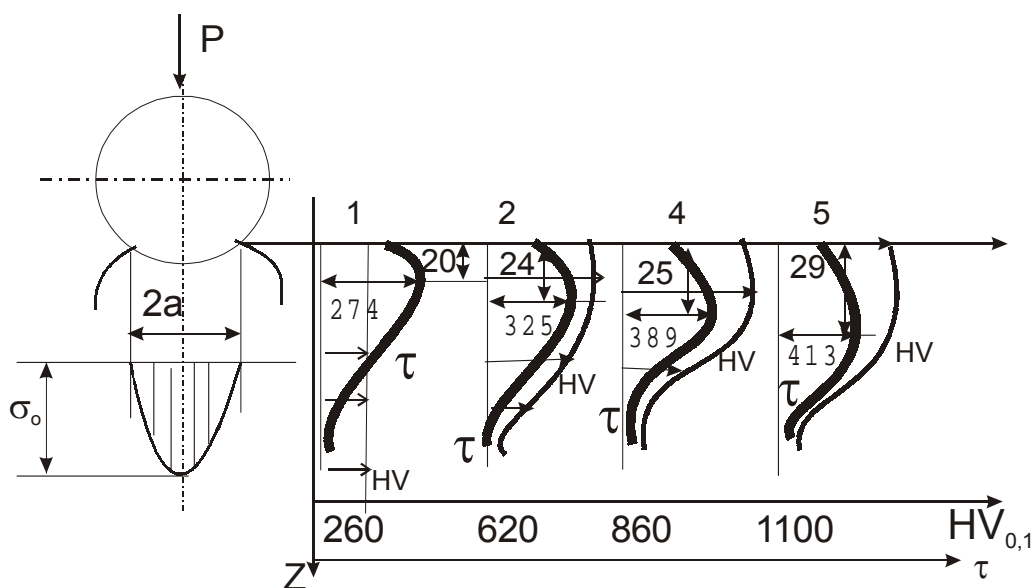
От графиката се установява, че колкото по-голяма е дълбочината на слоя, толкова по-навътре в слоя се намира  $z_{\tau_{max}}$  (дълбочина на разпространение на максималните тангенциални напрежения). При по-голяма повърхностна твърдост стойността на максималните тангенциални напрежения  $\tau_{max}$  е по-голяма. Вероятно с високата твърдост на нивото на максималните тангенциални напрежения се обяснява високата якост на контактна умора на стоманата при съответния метод на обработване.

Първият извод, който може да се направи е, че *колкото по-голяма е дълбочината на екстремума на тангенциалните напрежения  $z_{\tau_{max}}$ , толкова по-висока е контактната якост на умора на материала.* Този извод е от

съществено практическо значение за създаване на материали с висока контактно-уморна якост.

Това позволява да се избират повърхностните методи на обработка, така, че да доведат до създаването на повърхностни слоеве с висока контактна якост на умора. Прилагането на повърхностно уякчаващи обработки, в резултат на които се създават слоеве, чиято дълбочина е по-голяма от дълбочината на максималните тангенциални напрежения, е фактор, който способства за увеличаване ресурса на контактни детайли (зъбни колела, ролки, релси и др.).

Друг фактор, чието влияние е съществено за якостта на контактна умора е повърхностната твърдост и разпределението ѝ в дълбочина на слоя (фиг.9).



Фиг. 9. Разпределение на тангенциалните напрежения в контактната област при различна повърхностна твърдост

Установява се, че с **увеличаване на твърдостта мястото на максималните тангенциални напрежения  $z_{\tau \max}$**  се отдалечава от повърхността, което рефлектира върху контактна уморната якост, която нараства с увеличаване на повърхностната твърдост.

### ИЗВОДИ:

1. С увеличаване на дълбочината на разпространение на максималните тангенциални напрежения  $z_{\tau \max}$  нараства якостта на контактна умора на материала.
2. По-висока контактна якост на умора има уякчената стомана, чиято повърхностна твърдост е по-висока в сравнение с необработения материал.
3. Имайки пред вид изведените резултати при подбиране на технологичен режим на повърхностно уякчаваща обработка могат да се получават слоеве (материали) с различна контактно уморна якост.

4. Контактната якост на средно въглеродната стомана 38X2НМФА зависи от вида на повърхностната обработка - след нитроцементация се получава материал с най-висока контактна якост, малко по-ниска е след йонно азотиране, още по-малка е след индукционно закаляване, а най-ниска е в неукчената стомана.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мечикян, Балашев, Върху стабилността на контактната уморна якост на стомана 40Х закалена с ТВЧ, ЦНИИТМАШ
- [2] Трубин, Г. Контактная усталость материалов для зубчатых колес, М., Машгиз, 1962
- [3] Ishibashi A., Ueno T., Tanaka Sh., Surface Durability of Spur Gears at Hertzian Stresses Over Shakedown Limit, International Conference of Spur Gears, 8 -12 October, 1972, USA.
- [4] Tallian, T., Failure atlas for Hertz Contact Machine elements, ASME, 1992
- [5] Морозов, Е., М. Зернин, Контактные задачи механики разрушения, Москва, Машиностроение, 1999
- [6] V. Garnier, G. Corneloup, Characterisation by Rayleigh of the Superficial Layers of Nitrided or Cemented Steels, 7<sup>th</sup> European Conference on non-destructive Testing, Copenhagen, 26-29 may 1998.
- [7] Частно съобщение на проф. д-р М. Миховски, лаб. по Механика, диагностика и безразрушителен контрол, институт по Механика – БАН.
- [8] F. Ellyin, K. Golos, Multiaxial Fatigue Damage Criterion, Journal of Engineering Materials and Technology, January 1988, vol. 110, p. 63.

### ESTIMATION AT THE PARAMETERES OF THE CONTACT ON THE SURFASE HARDENED MATERIAL

Tatyana Avdjieva

**HIGHER TRANSPORT SCHOOL "T. KABLESHKOV"**  
**158 "GEO MILEV"STR., SOFIA, BULGARIA**

**Summary:** *This paper is an attempt to define the contact fatigue life of the 38X2НМФА steel after different methods of hardening. On the basis of a careful literary study and performed theoretical and experimental analyses is made the hypothesis, that as the deep of the maximum  $\square$  stresses are greater, the contact fatigue strength is higher. In support of this theory is made analyze of the different layers of the hardened material on the specimens of the middle carbon steel 38Cr2NMoV after hardening, ion nitriding, nitrocarburizing and induction hardening.*

**Key words:** *fatigue contact, tangential tensions, stiffness, improvement, induction hardening, ion nitriding, nitrocarburizing*