

ANALIZA MOMENTELOR DE STRÂNGERE ALE ASAMBLĂRILOR FILETATE CU UMĂR, DE LA GARNITURA DE FORAJ DE DIAMETRE MARI

Adrian CREÎȚARU, Nicolae GRIGORE, Ion FLOREA
Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, adriancreitaru@yahoo.com

Abstract

The paper presents the main problems of the make-up torque for the large diameter stem connections. These are executed in the shouldered threaded type. The make-up torque has to be correlated with the drill torque, meaning to prevent the re-make-up under the load. A principle diagram results for torque choice. For differential make-up torque, another solution for the wider of torque spectrum is that of multiple threads.

1. CONSIDERAȚII GENERALE

1.1. Forajul de diametre mari

Forajul de (cu) diametre mari face parte din categoria forajelor speciale. Mai este cunoscut, în mod uzual, și ca foraj minier, datorită numeroaselor aplicații în acest domeniu.

Metodele de foraj de diametre mari pot fi clasificate în [4]:

- metoda de foraj descendent (*engl.* – blind drilling), care poate fi realizată într-o treaptă, sau în mai multe trepte, cu diametre diferite de săpare (fig. 1, a);
- metoda de foraj ascendent (*engl.* – rise drilling), care presupune săparea unei găuri pilot, urmată de lărgirea acesteia, în sistem ascendent (fig. 1, b).

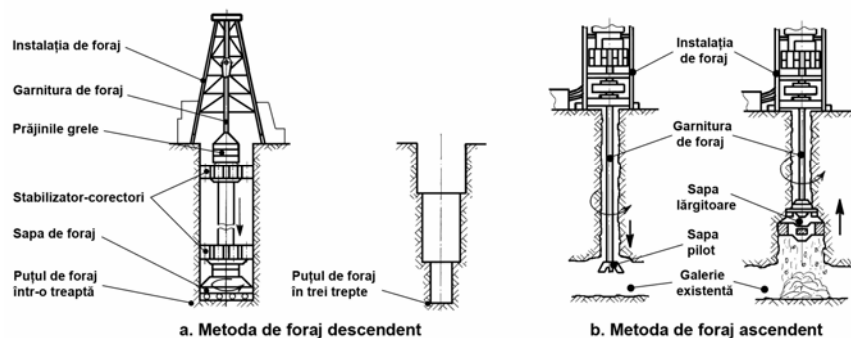


Fig. 1. Forajul de diametre mari; metoda de foraj descendent și metoda de foraj ascendent.

1.2. Garnitura de foraj

În forajul de diametre mari, garnitura de foraj are o componentă asemănătoare celei utilizate în forajul convențional. Gabaritele și, implicit greutatea componentelor, sunt însă mult mai mari. În forajul descendent, subansamblul de fund (sapă, stabilizator corectori, prăjini grele) are greutatea care depășește 150 t. Diametrele sondei reclamă utilizarea unor sape cu diametre într-o gamă specială: $d_s = 1,5...5 \text{ m}$. În mod excepțional însă, diametrele de săpare pot fi extinse până la 8...8,75 m.

Prăjinile de foraj pentru diametre mari au, față de cele din forajul convențional, diametre superioare. Tipodimensiunile de prăjini utilizate au diametre nominale cuprinse în intervalul de valori $d_p = 10...20 \text{ in}$ (250...500 mm) [2], [4].

Lungimea garniturii, care este alcătuită în cea mai mare parte din prăjini de foraj, este determinată de adâncimea de foraj. Uzual, adâncimile sunt limitate la $H_{max} = 50...650 \text{ m}$.

Prăjinile de foraj pot avea construcție simplă, dublă sau triplă. În ceea ce privește asamblările utilizate pentru prăjinile care formează garnitura, acestea pot fi de trei feluri [2], [4]: cu flanșe, cu șlițuri sau filetate. Asamblările filetate sunt mai mult folosite, datorită unor avantaje pe care le prezintă față de celelalte variante; ținând seama de diametrele mari ale îmbinării, soluția frecvent folosită este cea cu racorduri speciale filetate (pin-box).

1.3. Asamblări filetate cu umăr

Asamblările filetate utilizate în cadrul garniturilor de foraj sunt de tip cu umăr, filetate conic [5]. Soluția constructivă uzuală de realizare a prăjinilor este din bucăți; cele două capete filetate, numite racorduri speciale filetate (cep și mufă) sunt îmbinate cu corpul prăjinii [8]. Racordurile speciale au prelucrat filet conic exterior și, respectiv, interior, acest fapt făcând posibilă îmbinarea succesivă a prăjinilor și constituirea garniturii de foraj.

În forajul convențional de petrol și gaze, forma și dimensiunile tipizate ale racordurilor speciale filetate (fig. 2, a) sunt reglementate prin standarde cu largă recunoaștere internațională: API Spec. 7/1987, GOST 5286-75, ISO 2644-1975 sau STAS 835/1-80. Filetul conic utilizat este triunghiular, simetric în raport cu direcția radială [12], [13], [14].

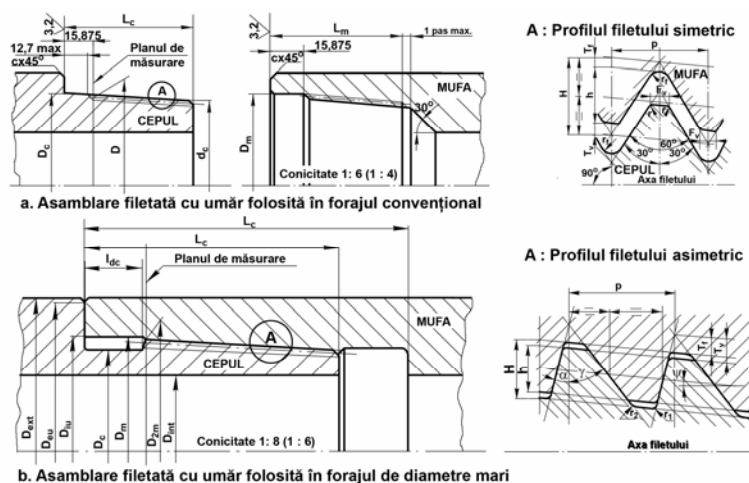


Fig. 2. Elementele asamblării filetate cu umăr și ale filetelor utilizate pentru îmbinările garniturii de foraj obișnuit și de diametre mari.

În forajul de diametre mari, încărcările axiale foarte mari au impus opțiunea pentru filete conice cu profil special, asimetric. Asamblările și profilele filetelor de acest tip nu au fost, până în prezent, standardizate (fig. 2, b) [2]. Tipodimensiunile de prăjini au asamblări filetate cu umăr cu dimensiuni nominale în intervalul $d_n = 10...20$ in (cca. 250...500 mm).

Prima parte a intervalului menționat (10...13 in) cuprinde tipodimensiuni folosite, în general, în forajul ascendent [11], iar valorile mai mari, din partea a doua a intervalului, sunt proprii aplicării metodei de foraj descendent de diametre mari. Între acestea, tipodimensiunea de prăjină de foraj de $14 \frac{3}{8}$ in – care a fost amplu analizată în cadrul lucrărilor [1], [2] și [3] – este una dintre cele mai folosite în forajul descendent.

Se impune precizarea că tipul, geometria și caracteristicile mecanice ale filetelor influențează în bună măsură comportarea în exploatare a asamblării cu umăr. În egală măsură, umărul asamblării – prin formă, dimensiuni, elemente de precizie și de calitate a suprafeței – determină într-o măsură similară comportarea în funcționare a asamblării. Aspectele funcționale menționate se referă la momentele de înșurubare (prestrângere) și la realizarea condiției de autofrânare.

Condițiile de funcționare specifice asamblărilor filetate cu umăr pentru diametre mari a impus analiza oportunității utilizării filetelor cu mai multe începuturi. Lucrările [2] și [3] dezbate și justifică aceasta opțiune, motiv pentru care va fi considerată și această soluție.

2. MOMENTELE DE STRÂNGERE ALE ASAMBLĂRILOR

2.1. Momentele de strângere. Coeficienții strângerii inițiale la înșurubare

La constituirea garniturii de foraj, adăugarea fiecărei prăjini se face prin înșurubarea capetelor cep-mufă. Momentul de strângere a asamblării este dependent de mai multe variabile:

- tipodimensiunea asamblării (prin dimensiunile acesteia);
- caracteristicile de frecare ale filetului și ale umărului de contact;
- diametrul de săpare al sondei, care determină nivelul sarcinii de exploatare;
- adâncimea maximă de săpare, care determină greutatea și sarcina de exploatare;
- tipul de rocă în care se forează, care determină o anumită apăsare pe sapă;
- numărul de începuturi al filetului (în cazul filetelor multiple);
- poziția asamblării în cadrul garniturii (în cazul strângerii diferențiate);
- momentul de torsiune de lucru etc.

Dacă se consideră:

- M_{s1} – momentul forțelor de frecare dezvoltate în filet, la înșurubare;
- M_{s2} – momentul de frecare de pe umărul asamblării, momentul de înșurubare este:

$$M_s = M_{s1} + M_{s2} = F_o \cdot \left[\frac{d_{2m}^{(i)}}{2} \cdot \operatorname{tg}(\beta_{2m}^{(i)} + \varphi') + \frac{\mu_{ui}}{3} \cdot \frac{d_{eu}^3 - d_{iu}^3}{d_{eu}^2 - d_{iu}^2} \right] \quad (1)$$

în care:

- F_o este forța axială de strângere a asamblării (prestrângerea);
- $d_{2m}^{(i)}$ – diametrul mediu al filetului, pentru filetul simplu sau multiplu;
- $\beta_{2m}^{(i)}$ – unghiul de înclinare mediu al desfășurării elicei medii a spirei filetului conic;
- φ' – unghiul de frecare raportat;
- μ_{ui} – coeficientul de frecare pe umărul asamblării, la înșurubare;
- d_{eu} și d_{iu} – diametrele la exterior și la interior ale umărului asamblării;
- (i) – numărul de începuturi al filetului asamblării, în cazul utilizării filetelor multiple.

Realizarea aplicațiilor de determinare a momentelor de înșurubare, pentru diferite mărimi de îmbinări cu umăr, poate folosi [2] o formă restrânsă a relației (1):

$$M_s = M_{s1} + M_{s2} = a_{si}^{(i)} \cdot F_o \quad (1')$$

În relația (1') $a_{si}^{(i)}$ este coeficientul strângerii inițiale la înșurubare, cu valori în $[mm]$ sau $[m]$.

Un aspect important îl constituie determinarea proporției dintre momentele M_{s1} și M_{s2} , dezvoltate la înșurubarea prăjinilor. Pentru ilustrarea acestuia s-au considerat mai multe cazuri de considerare a coeficienților de frecare din filet, μ_f și de pe umăr, μ_{ui} , care pot corespunde unor anumite rugozități ale suprafețelor, consistență a ungerii și de uzură a acestor suprafețe în funcționare:

- Cazul I - rugozități identice, ungeri bună și suprafețe fără uzură: $\mu_f = \mu_{ui} = 0,08$;
- Cazul II - rugozități diferite, ungeri bună și suprafețe fără uzură: $\mu_f = 0,08$; $\mu_{ui} = 0,1$;
- Cazul III - rugozități diferite, ungeri medie și suprafețe cu uzură normală: $\mu_f = 0,1$; $\mu_{ui} = 0,15$;
- Cazul IV - rugozități diferite, ungeri slabă și suprafețe cu uzură mare: $\mu_f = 0,12$; $\mu_{ui} = 0,2$;
- Cazul V - rugozități diferite, ungeri slabă și suprafețe cu uzură mare: $\mu_f = 0,15$ și $\mu_{ui} = 0,24$.

Prin aplicarea relației (1), pentru asamblarea cu umăr de $14 \frac{3}{8}$ in și perechile de valori menționate ale coeficienților de frecare, au rezultat situațiile prezentate în figura 3.

Evaluarea cantitativă a momentelor de înșurubare ale asamblării se poate face pe baza determinării valorilor coeficienților strângerii inițiale la înșurubare. Pentru determinarea acestora, s-au considerat următoarele:

- asamblări de $14 \frac{3}{8}$ in realizate cu 1, 2 sau 3 începuturi;
- conicitatea asamblării (uzuală) de 1:8;

- unghiurile de înclinare medii corespunzătoare: $\beta_{2m}^{(1)} = 1,024^\circ$, $\beta_{2m}^{(2)} = 2,055^\circ$ și $\beta_{2m}^{(i)} = 3,089^\circ$, determinate pentru $p^{(1)} = 20 \text{ mm}$, $p^{(2)} = 40 \text{ mm}$ și $p^{(3)} = 60 \text{ mm}$;
 - diametrele medii ale filetelor $d_{2m}^{(1)} = 355,876 \text{ mm}$ (filet cu 1 început), $d_{2m}^{(2)} = 354,809 \text{ mm}$ (filet cu 2 începuturi) și $d_{2m}^{(3)} = 353,884 \text{ mm}$ (filet cu 3 începuturi);
 - diametrele limită pentru umerii în contact: $d_{eu} = 416 \text{ mm}$ și $d_{iu} = 380 \text{ mm}$;
 - coeficienți de frecare, pe umăr și în filet la valori cuprinse în intervalul de valori $[0,06...0,21]$, conform detalierei din tabelul 1.
- Aceleași determinări s-au făcut și pentru asamblarea de $14 \frac{3}{8} \text{ in}$, cu conicitatea 1:6.



Fig. 3. Ponderele momentelor de frecare în filet și pe umăr, pentru diverse situații de contact.

În baza rezultatelor calculate ale coeficientului strângerii inițiale, $a_{si}^{(i)}$ (tabelul 1), se determină rata de modificare a acestui coeficient, prin utilizarea filetelor cu 2 sau 3 începuturi.

Tabelul 1

Conicitatea 1 : k	Coeficienții de frecare		Numărul de începuturi, (i)	Coeficientul strângerii inițiale $a_{si}^{(i)}$ [mm]	Multiplicarea valorii coeficientului $a_{si}^{(i)}$ față de cel al filetelui cu 1 început [%]	
	Pe umăr	În filet				
	μ_{ui}	μ_f				
1 : 8	0,07	0,06	1	28,194	-	
			2	31,363	11,24	
			3	34,549	22,54	
		0,09	0,06	1	30,039	-
				2	33,213	10,56
				3	36,400	21,18
			0,13	1	41,136	-
				2	44,329	7,76
				3	47,547	15,58
	0,15	0,06	1	44,122	-	
			2	47,295	7,19	
			3	50,479	14,41	
		0,09	0,06	1	49,665	-
				2	52,843	6,4
				3	56,037	12,83
			0,13	1	57,067	-
				2	60,258	5,59
				3	63,477	11,23
	0,21	0,06	1	56,070	-	
			2	59,207	5,59	
			3	62,427	11,34	
		0,09	0,06	1	61,613	-
				2	64,791	5,16
				3	67,985	10,34
0,13			1	69,015	-	
			2	72,206	4,62	
			3	75,425	9,29	

Multiplicarea coeficientului (rata de modificare) se determină cu relații de forma:

$$\Delta a_{as}^{(i)} = \frac{a_{si}^{(i)} - a_{si}^{(1)}}{a_{si}^{(1)}} \quad (2)$$

Determinarea multiplicării coeficientului $a_{si}^{(i)}$ (prin rata de modificare) reflectă, practic, posibilitățile de creștere ale momentului de înșurubare, M_s , prin trecerea de la utilizarea filetelui cu un început, la filete cu mai multe începuturi. Aceste modificări sunt prezentate în graficul din figura 4.

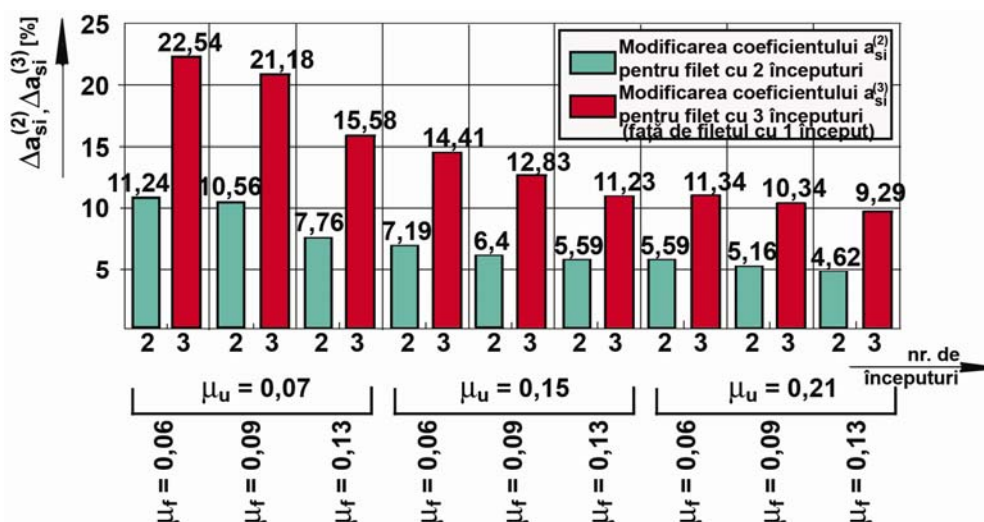


Fig. 4. Modificarea coeficientului strângerii inițiale și a momentului de strângere a asamblării, la folosirea filetelor cu mai multe începuturi.

2.2. Relația dintre momentul de strângere și momentul de lucru

Alegerea momentelor de strângere inițială ale asamblărilor garniturii de foraj este o problemă determinantă pentru rezistența acestora și, implicit, pentru siguranța garniturii de foraj.

Pentru asamblările garniturii – de poziție (k), ordonate de jos în sus – se prescriu momentele de înșurubare (strângere inițială) $M_{s1} \dots M_{sn}$. Acestea depind, prin relația (1) de forțele axiale de strângere inițială. Dezvoltarea, la strângere și în exploatare, a sarcinilor axiale este reglementată de diagramele forță-deformație, corespunzătoare pentru fiecare asamblare de rang (k).

Față de forajul convențional [12], [14], în care se practică strângerea identică a asamblărilor garniturii (fig. 5. a), în forajul de diametre mari există tendința de aplicare a strângerilor diferențiate [2], [7] (fig. 5. b).

Alegerea unor strângeri diferențiate ale asamblărilor, crescătoare de la talpă către gura sondei poate eficientiza încărcările și spori durabilitatea garniturii [7]. Controlul strângerii, realizabil cu clești specializați, acționați hidraulic, poate constitui un argument suplimentar pentru aceste strângeri diferențiate.

Față de intervalul de valori în care sunt cuprinse momentele de strângere ale asamblărilor, nivelul momentelor de torsiune de lucru (de foraj) trebuie să fie situate la valori inferioare.

Plafonarea momentului de lucru maxim, sub nivelul momentelor de strângere (fig. 6), are ca motiv principal *evitarea strângerii suplimentare sub sarcină*. După cum se cunoaște, această posibilitate implică riscuri mari pentru rezistența asamblărilor, constituind un pericol major în funcționarea acestora.

Stabilirea și respectarea plafoanelor momentelor de lucru, ca și a celor de strângere, constituie o condiție funcțională importantă.

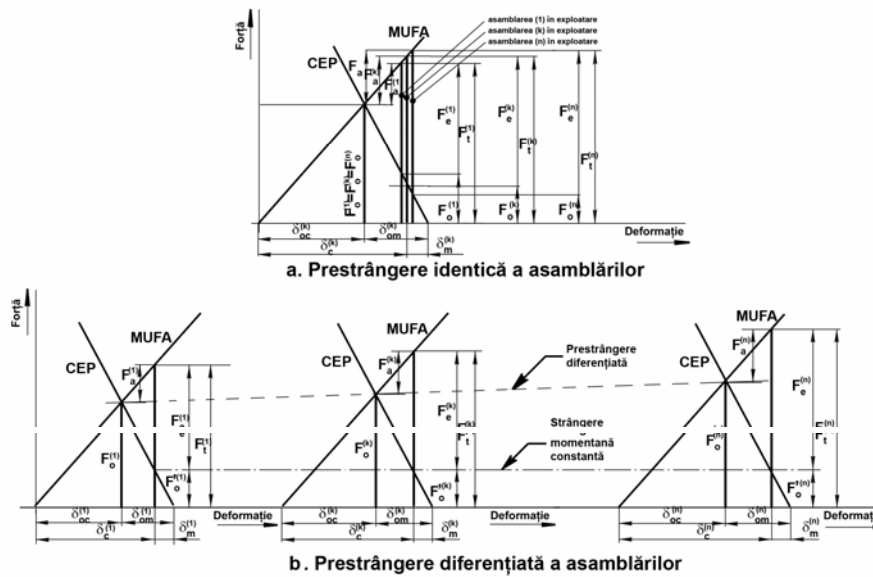


Fig. 5. Diagramele forță-deformație, pentru determinarea componentelor axiale, la cele două tipuri de strângeri ale asamblărilor: identică (a) și diferențiată (b).

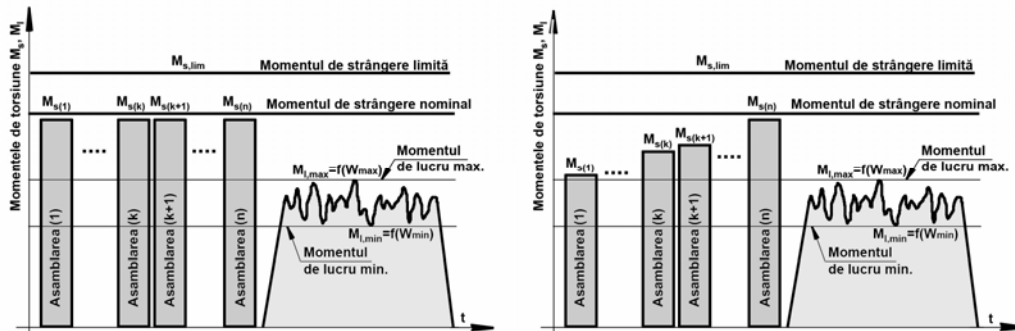


Fig. 6. Relația dintre momentele de strângere și cele de foraj, pentru cele două tipuri de înșurubări.

2.3. Condiția de autofrânare

Verificarea condiției de autofrânare, pentru asamblările filetate cu umăr, constituie unul dintre criteriile funcționale fundamentale, care poate garanta – în anumite limite – menținerea componentelor în asamblare. Pierderea acestei condiții poate însemna, pentru garnitura de foraj, auto-desfacerea componentelor și, implicit, accidente tehnice grave.

Este cunoscută, din teoria generală a filetelor [6], metoda de stabilire a acestei condiții; prin scrierea relației între sarcina tangențială care dă moment de înșurubare și sarcina axială dezvoltată în asamblare, rezultă relația uzuală:

$$\beta_m \leq \varphi \quad (3)$$

În condițiile folosirii filetelor speciale asimetrice, cu unghiul flancului activ (α) ne-nul, diametrul mediu al filetelor (d_{2m}) variabil pe con, iar pasul (p) dependent de numărul de începuturi (i) ale filetelor, condiția de autofrânare devine:

$$\beta_{2m}^{(i)} \leq \varphi' \quad (3')$$

Prin substituirea mărimilor a căror notare este consacrată, se obține relația:

$$\arctg \frac{i \cdot p_a}{\pi \cdot d_{2m}^{(i)}} \leq \arctg \frac{\mu_f}{\cos \alpha} \quad (4)$$

Utilizarea acestei relații dă și posibilitatea de determinare a limitei superioare a numărului de începuturi, pentru un filet dat, în condițiile impuse de autofrânare [2].

Condiția de autofrânare a fost detaliat cercetată, în lucrarea [2]. Deși aparența este alta, pe asamblările cercetate nu s-au constatat depășiri ale condiției de autofrânare.

În baza impunerii acestei condiții au fost determinate și limitele (maxime) acceptabile ale utilizării filetelor multiple:

- pentru tipodimensiuni de prăjini 10 in și de 14 $\frac{3}{8}$ in, $i_{max} = 3$ începuturi;
- pentru tipodimensiuni de prăjini 20 in, $i_{max} = 5$ începuturi.

Utilizarea filetelor multiple este limitată însă și de problemele tehnologice pe care le implică execuția lor [3]; practic, utilizarea acestora poate fi restrânsă la 2-4 începuturi.

Pentru asamblarea analizată, s-a încercat și determinarea influenței pe care o are numărul de începuturi asupra cuantumului de momente (M_{s1} - în filet, M_{s2} - pe umăr). A rezultat situația comparativă din figura 7.

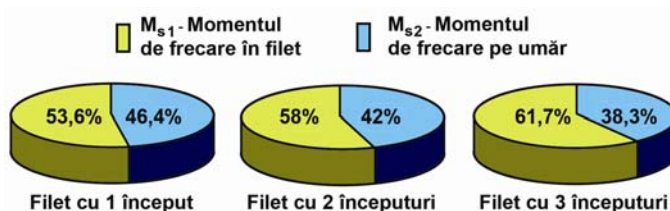


Fig. 7. Influența numărului de începuturi asupra ponderii momentelor de frecare din filet și de pe umăr.

2.4. Efectele momentului de strângere în sfera tensiunilor

Cercetarea efectelor înșurubării asamblărilor garniturii de foraj analizate se poate realiza și prin aplicarea Metodei Elementului Finit. În cadrul programului de analiză [2] s-au realizat rulări cu programul ANSYS, pe un model axial-simetric (PLANE 2) al structurii ansamblului mufă-cep. Au fost utilizate elemente de contact, cu frecare, pentru spirele în contact și pentru umerii asamblării. A fost determinată starea de tensiuni și deformații pentru trei cazuri de solicitare, care simulează strângeri uzuale ale asamblării 14 $\frac{3}{8}$ in:

- cazul **p 50**: moment de strângere $M_{s1} \approx 39$ kN·m și forță de prestrângere $F_{o1} = 1125$ kN;
- cazul **p 100**: moment de strângere $M_{s1} \approx 78$ kN·m și forță de prestrângere $F_{o1} = 2251$ kN;
- cazul **p 150**: moment de strângere $M_{s1} \approx 117$ kN·m și forță de prestrângere $F_{o1} = 3376$ kN.

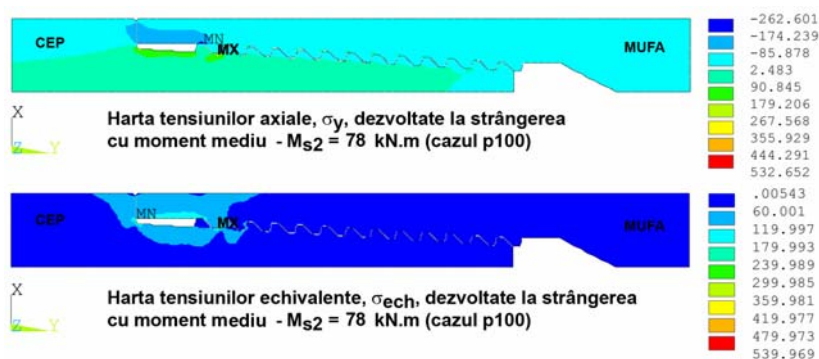


Fig. 8. Tensiunile axiale și echivalente din structura de tip mufă-cep, pentru cazul de prestrângere p100.

Rezultatele obținute, sub forma hărților de tensiuni (σ_y , σ_x , σ_z și $\sigma_{ech} \equiv \sigma_{vm}$) și a valorilor de tensiuni și deformații, din nodurile de contur (selectate) ale structurii, au condus la concluzii importante privind:

- influența nivelului de încărcare al asamblării asupra stării de tensiuni;
- distribuția încărcării pe spirele în contact ale cepului și mufei;
- deplasările și deformațiile corespunzătoare;

- zonele de intensificare a tensiunilor prin efectul de concentrare de tensiuni;
- locațiile și valorile maxime ale tensiunilor cât și ale deplasărilor etc.

În figura 8 au fost selectate hărțile, mai relevante, ale tensiunilor axiale și echivalente, care au rezultat la încărcarea cu valoarea maximă a momentului de strângere.

3. CONCLUZII

Din analiza realizată asupra momentelor de strângere a asamblărilor filetate cu umăr, pentru foraj de diametre mari, se pot desprinde următoarele concluzii:

- nivelul momentelor de strângere este determinat de factori constructiv-geometrici ai garniturii, factori constructivi ai găurii de sondă, parametri funcționali (de frecare) ai filetului și ai umărului, regimul de lucru etc.;
- ponderea celor două fracțiuni ale momentului de înșurubare este influențată hotărâtor de starea suprafețelor de frecare, ungerea cât și evoluția tribologică a acestora; deteriorarea condițiilor menționate, determină o ridicare a ponderii frecării pe umăr;
- pentru asamblarea analizată, evaluările numerice ale coeficientului forței axiale a condus la valori cuprinse în intervalul $a_{si}^{(i)} = 28...75 \text{ mm}$; cu înăsprirea condițiilor de frecare, acest coeficient prezintă creșteri importante: între 2,1 și 2,5 ori, funcție de (*i*);
- opțiunea pentru filete multiple determină o creștere a coeficientului forței axiale și, implicit, a nivelurilor momentelor de înșurubare; creșterile sunt de 5 - 23%, funcție de (*i*);
- este importantă plafonarea momentelor de lucru, indiferent de metoda aplicată, sub nivelul minim de strângere a asamblărilor; se evită astfel strângerea acestora sub sarcină;
- pentru asamblarea analizată, condiția de autofrânare este respectată, pentru toate condițiile de frecare, la filete executate cu 1, 2 și 3 începuturi;
- cu creșterea numărului de începuturi, ponderea frecării din filet este mai mare;
- analiza prin MEF arată o evidentă concentrare a tensiunilor la aplicarea momentului de strângere a asamblării; zonele de concentrare se află la bazele spirelor și la degajarea cepului; este evidentă repartiția inegală a încărcării pe spirele în contact ale componentelor.

BIBLIOGRAFIA

1. CREIȚARU, A., PUPĂZESCU, AI. – *Calculul asamblărilor filetate cu umăr prin metode numerice*, Jurnalul de Petrol și Gaze nr. (5) 35, Ploiești, 2002.
2. CREIȚARU, A. – *Contribuții la studiul asamblărilor garniturilor utilizate în forajul de diametre mari*, Teză de doctorat, Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, 2004.
3. CREIȚARU, A. RAȘEEV, D. – *Oportunitatea și implicațiile utilizării filetelor cu mai multe începuturi pentru asamblările cu umăr ale garniturii de foraj*, Buletinul Sesiunii de Comunicări Științifice a Universității Petrol-Gaze. Ploiești, 2005.
4. IORDACHE, Gh. ș. a. – *Forarea sondelor cu diametre mari*, Editura tehnică, București, 1983.
5. LARI, I. – *Sinteza de date asupra tipodimensiunilor și caracteristicilor mecanice și fizice ale elementelor garniturii de foraj, necesare lucrărilor din bazele tubulare*, Ministerul Petrolului București, 1984.
6. MANEA, Gh. – *Organe de mașini – vol. I*, Editura tehnică, București, 1975.
7. ONCESCU, Gh., ȘOVĂREL, E. – *Studiul parametrilor asamblărilor filetate la garnituri de forare de $14 \frac{3}{8}$ inch, în vederea optimizării ansamblului*, C.C. UPG-IPCUP, Ploiești.
8. RAȘEEV, D. ș. a. – *Construcția și exploatarea garniturii de foraj*, Editura tehnică, București, 1986.
9. TEODORIU, C. – *Analysis of the Make-up Procedure and Evaluation of Conical Shouldered Threaded Connections*, Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld, Germany, 2003.
10. ULMANU, V., RAȘEEV, D. – *Determinarea momentului optim de înșurubare a racordurilor speciale*, Studii și cercetări de mecanică aplicată nr. 1, București, 1976.
11. * * * – *Studiu tehnico-economic privind stabilirea gamei de instalații destinate forajului suitorilor de mină și alegerea tipurilor recomandate pentru asimilare*, IPCUP, București, 1972.
12. * * * – *STAS 835/1-80 – Îmbinări cu umăr pentru garnitura de foraj*, București, 1980.
13. * * * – *Garnitura de foraj de $14 \frac{3}{8}$ in, pentru instalația de foraj F 400-DH-M*, IPCUP, Ploiești, 1986.
14. * * * – *API Specification 7*, Washington DC, 1987.