

Μοντελοποίηση (FEM) της δυναμικής συμπεριφοράς του κοπτικού εργαλείου κατά το φραιζάρισμα

Κατά την διάρκεια των κοπών η κοπτική ακμή καταπονείται ομοιόμορφα σε μήκος της επιφάνειας αποβλίπτου ίσο με το πλάτος του αποβλίπτου και για βάθος ίσο με το πραγματικό πάχος αποβλίπτου. Πρόκειται για τυπική εντατική περίπτωση επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain) την οποία υποστηρίζουν όλες οι εμπορικές εφαρμογές πεπερασμένων στοιχείων και η οποία οδηγεί σε δισδιάστατο υπολογιστικό πρόβλημα. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η ελαχιστοποίηση υπολογιστικού σφάλματος λόγω δυνατότητας χρησιμοποίησης των υπολογιστικών δυνατοτήτων στην επίλυση πυκνότερου πλέγματος.

Οι δυνάμεις κοπής και ο μηχανισμός παραμόρφωσης του αποβλίπτου, στοιχεία απαραίτητα για την διεξαγωγή της προσομοιωτικής διαδικασίας, ελήφθησαν με την διεξαγωγή αντιστοίχων πειραμάτων τórνευσης για τρία υλικά, σκληρομέταλλα, που αναφέρονται παρακάτω . Μέσω της διαδικασίας αυτής, προσδιορίστηκαν οι τεχνολογικές σταθερές των δυνάμεων κοπής, σαν συνάρτηση της ταχύτητας κοπής.

Για την ανάπτυξη ενός αναπαραγόμενου μοντέλου, ικανό να υπολογίζει κατανομές τάσεων, ανεξάρτητα από γεωμετρικούς και δυναμικούς περιορισμούς, η προσομοίωση διεξήχθη παραμετρικά, χρησιμοποιώντας παραμετρική γλώσσα ανάπτυξης την οποία υποστηρίζει το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων (Ansys) που χρησιμοποιήθηκε. Έτσι, το πάχος της επικάλυψης, οι διαστάσεις του παραμορφωμένου αποβλίπτου, οι δυνάμεις κοπής και οι διαστάσεις του μοντέλου αποτελούν μεταβλητές παραμέτρους της προσομοίωσης, επιτρέποντας έτσι τον υπολογισμό των τάσεων για κάθε περίπτωση κατεργασίας.

Μοντελοποίηση FEM

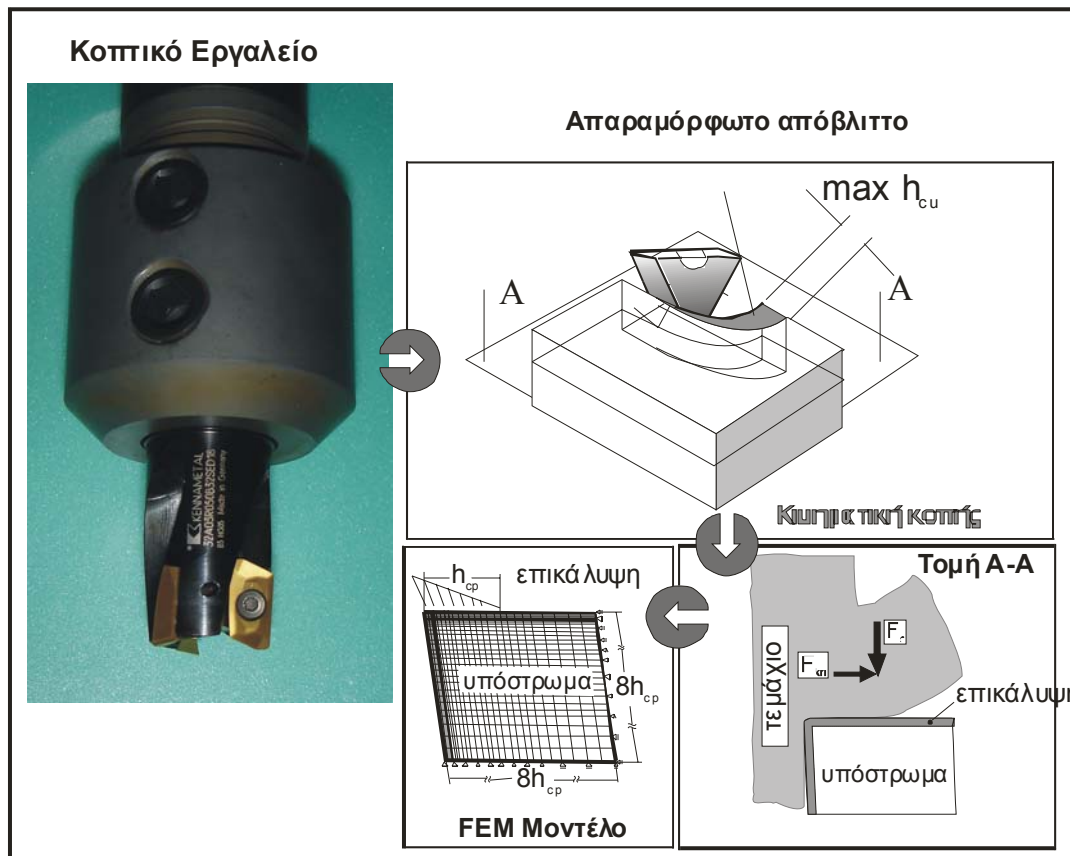
Περνώντας στο υπολογιστικό μέρος της παρούσας εργασίας, για την διεύρυνση των μηχανισμών αστοχίας και φθοράς της επικάλυψης κατά το φρεζάρισμα καθώς επίσης και για τη μελέτη της καταπόνησης της κοπτικής ακμής και του υποστρώματος του κοπτικού μαχαιριού, θα παρουσιάσουμε παρακάτω ένα μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας φραιζαρίσματος με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, σύμφωνα με την κινηματική της κοπής, για τη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης. Επιπλέον θα παρουσιαστεί η κατάλληλη τροποποίηση του μοντέλου αυτού, για τη διερεύνηση της δύναμης συνάφειας ανάμεσα στην επικάλυψη και το υπόστρωμα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω του μοντέλου προσομοίωσης, αφορούν στη διερεύνηση των μηχανικών καταπονήσεων που εφαρμόζονται στην κοπτική ακμή. Η διερεύνηση των θερμικών καταπονήσεων της κοπτικής ακμής είναι έμμεση, με δεδομένο ότι τρία κύρια μεγέθη που λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο, όπως η δύναμη κοπής, η συμπίεση και το μήκος επαφής του αποβλίπτου, επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την κοπή.

Βασικό μοντέλο προσομοίωσης της κοπής με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων

Λαμβάνοντας υπόψη την επιλεγμένη γεωμετρία κοπής, η κοπτική ακμή φορτίζεται ομοιόμορφα κατά μήκος του αξονικού βάθους κοπής και τη γωνία τοποθέτησης του εργαλείου. Επιπλέον η προσομοίωση της επαφής μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου κατεργασίας επιτρέπει τον ποσοτικό προσδιορισμό της επίδρασης των μηχανικών τάσεων στην αστοχία της επικάλυψης. Για το σκοπό αυτό, λήφθηκαν υπόψη κρίσιμες τάσεις κόπωσης και πειραματικά τεχνολογικά δεδομένα της κοπής. Τα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα εκφράζουν ποιοτικά την επίδραση του σχεδιασμού του εργαλείου στη συνολική συμπεριφορά κοπής, όπως επίσης την επίδραση της συμπεριφοράς της επικάλυψης.

Για το κοπτικό εργαλείο, δεδομένης της σχεδόν μηδενικής συνιστώσας δύναμης κοπής, αυτή η εντατική κατάσταση αντιστοιχεί σε μια τυπική ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης. Με τον τρόπο αυτό, ένα πρόβλημα τριών διαστάσεων μετατρέπεται σε επίπεδο, επιτρέποντας έτσι την καλύτερη διακριτοποίηση των κόμβων, μειώνοντας σημαντικά το συνεπαγόμενο σφάλμα που εισάγεται λόγω του τρισδιάστατου προβλήματος και φυσικά μειώνοντας το χρόνο επίλυσης του. Στο δεξιό τμήμα του παρακάτω σχήματος απεικονίζεται η στρατηγική προσομοίωσης. Το σύστημα κοπτικού εργαλείου - τεμαχίου κατεργασίας προσομοιώνεται όπως αναφέρθηκε μέσω του μοντέλου επίπεδης παραμόρφωσης της επικαλυμμένης κοπτικής ακμής.



Στρατηγική προσομοίωσης της κοπτικής ακμής με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

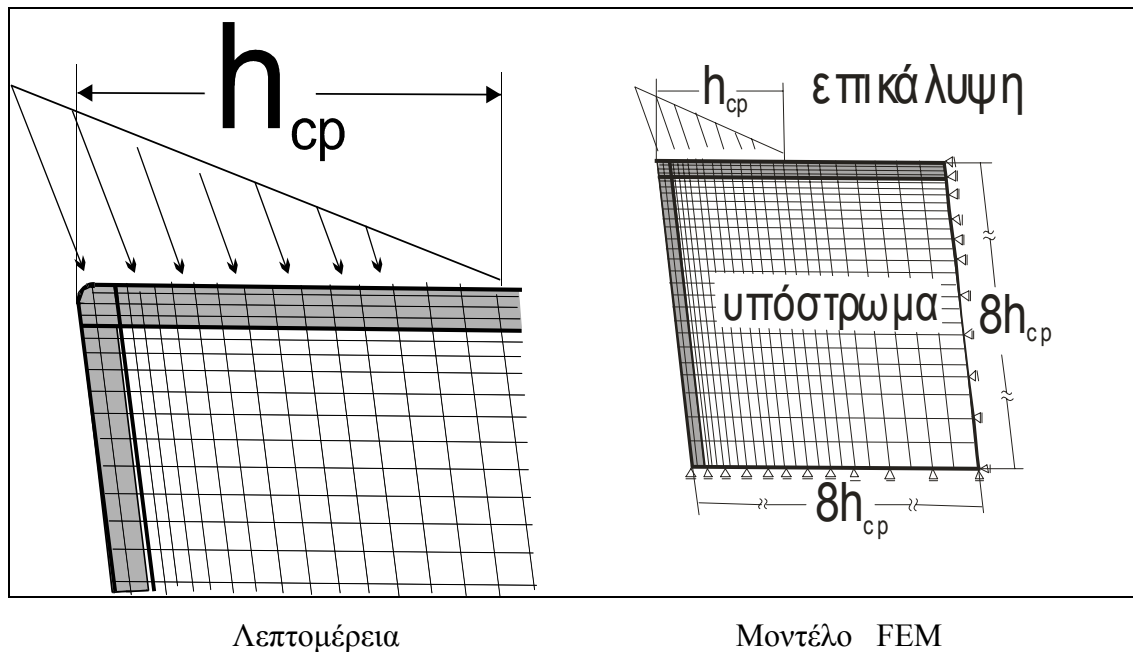
Η οπτική παρακολούθηση των παραγόμενων επιφανειών, το επίπεδο του παραγόμενου θορύβου, όπως επίσης και το χρώμα Του παραγόμενου αποβλίπτου, αποτελούν στοιχεία για την κατάσταση της κοπτικής ακμής. Στα πειράματα κοπής με σκληρομέταλλα γίνονται με ξηρά κοπή. Κάθε πείραμα γίνονταν διατηρώντας σταθερές όλες τις συνθήκες κοπής και παρατηρώντας την κοπτική ακμή μετά από έναν προκαθορισμένο αριθμό κοπών. Η παρακολούθηση γίνονταν με τη βοήθεια του σαρωτικού ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Λόγω της επιλεγμένης γεωμετρίας κοπής, η κοπτική ακμή φορτίζεται ομοιόμορφα κατά μήκος του αξονικού βάθους κοπής και τη γωνία τοποθέτησης του εργαλείου. Για το κοπτικό εργαλείο, αυτή η εντατική κατάσταση αντιστοιχεί σε μια τυπική ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης. Το σύστημα κοπτικού εργαλείου- τεμαχίου κατεργασίας προσομοιώνεται μέσω του μοντέλου επίπεδης παραμόρφωσης της κοπτικής ακμής. Οι δυνάμεις κοπής εισάγονται με τη μορφή επιφανειακών κανονικών και εφαπτομενικών κατανομών πίεσης και προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας την κινηματική της κοπής, τις προκαθορισμένες δυνάμεις κοπής και το λόγω παραμόρφωσης του αποβλίπτου.

Τα φορτία της κοπής εφαρμόζονται με τη μορφή ορθών και εφαπτομενικών επιφανειακών κατανομών πίεσης, τα οποία καθορίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη εξολοκλήρου την κινηματική της κοπής, τις μετρημένες δυνάμεις κοπής και το μήκος επαφής αποβλίπτου (h_{cp}). Οι καταστατικοί νόμοι της επικάλυψης και του υποστρώματος λαμβάνονται επίσης υπόψη στην προσομοίωση των πεπερασμένων στοιχείων. Επιδίωξη ήταν η κατασκευή ενός μοντέλου που να έχει τη δυνατότητα να αναπαραχθεί ανεξάρτητα από γεωμετρικά δεδομένα και άλλους περιορισμούς. Για το λόγο αυτό η προσομοίωση έγινε παραμετρικά, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού που υποστηρίζει το λογισμικό των πεπερασμένων στοιχείων

Η προαναφερθείσα προσομοίωση του φραιζαρίσματος προϋποθέτει τη γνώση των τεχνολογικών δεδομένων που σχετίζονται με τις δυνάμεις κοπής και τη γεωμετρία επαφής. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα μεγέθη αυτά εξαρτώνται από τη γεωμετρία της κοπτικής ακμής, την κινηματική της κοπής και τα

στοιχεία του κατεργαζόμενου τεμαχίου, για να προχωρήσει κανείς θα έπρεπε να τα προσδιορίσει πειραματικά. Επιπλέον η **συμπιεστότητα** ($\lambda = h_{cp} / h_{cu}$) του αποβλήτου, που εκφράζεται μέσω του λόγου παραμόρφωσης, προσδιορίστηκε πειραματικά για το υπό εξέταση υλικό μέσω πειραμάτων τριτοβάθμιας. Η πειραματική διάταξη εκλέχθηκε ώστε οι συνθήκες κοπής (επικάλυψη υπόστρωμα, γεωμετρία κοπής, πρόωση, ταχύτητα κοπής κτλ.) να είναι ίδιες με τα αντίστοιχα πειράματα του φραιζαρίσματος.

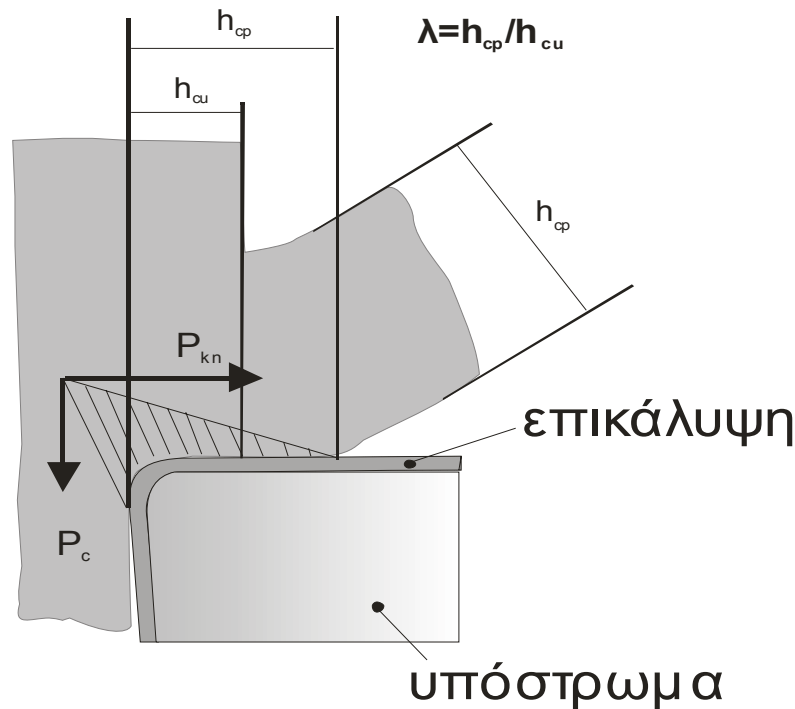
Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το μοντέλο προσομοίωσης της κοπτικής ακμής με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, όπως αυτό παρουσιάστηκε στην παραπάνω παράγραφο. Η πυκνότητα του πλέγματος επιλέχθηκε, ώστε να παρέχει το βέλτιστο συνδυασμό υψηλής διακριτοποίησης και ταχύτητας επίλυσης. Οι βασικές διαστάσεις του μοντέλου εκλέχθηκαν έτσι ώστε οι οριακές συνθήκες να βρίσκονται μακριά από τα αναπτυσσόμενα πεδία τάσεων.



Μοντέλο προσομοίωσης της κοπτικής ακμής με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, διακριτοποίηση κόμβων και οριακές συνθήκες.

h_{cp} : μήκος επαφής αποβλήτου

Παρακάτω παρουσιάζουμε τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο προσομοίωσης της κοπτικής ακμής :



Δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο προσομοίωσης της κοπτικής ακμής και για το λόγο αυτό οι διαστάσεις ήταν συνάρτηση του πάχους αποβλίπτου.

Όπως διακρίνεται στο σχήμα, ως οριακές συνθήκες εκλέχθηκαν παράλληλα και απέναντι από τις επιφάνειες ελευθερίας και αποβλίπτου αντίστοιχα. Τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο προσομοίωσης της κοπτικής ακμής παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα. Όπως προαναφέρθηκε, με κατάλληλη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε, ήταν δυνατή η πραγματοποίηση ενός παραμετρικού και εύκολα αναπαραγωγίμου μοντέλου, στο οποίο ελήφθησαν υπόψη οι παρακάτω παράμετροι :

- α : γωνία ελευθερίας
- γ : γωνία αποβλίπτου
- ρ_k : ορθό φορτίο κοπής
- $\rho_{εφ}$: εφαπτομενικό φορτίο κοπής
- $\rho_{ακ}$: δρώσα ακτίνα καμπυλότητας κοπτικής ακμής
- t : πάχος επικάλυψης
- h_{cp} : πάχος αποβλίπτου πραγματικό μετά την κοπή
- h_{cu} : πάχος αποβλίπτου θεωρητικό πριν την κοπή

- μηχανικές ιδιότητες υλικού επικάλυψης και υποστρώματος (καμπύλες τάσης παραμόρφωσης)

Η επικαλυμμένη κοπτική ακμή περιγράφεται από ένα μοντέλο επίπεδης παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Τα φορτία κοπής που προκύπτουν, κατανεμημένα τριγωνικά στην επιφάνεια αποβλίπτου, μετασχηματίζονται σε ορθές (P_n) και εφαπτομενικές (P_t) επιφανειακές πιέσεις, που ενεργούν σε κάθε στοιχείο περίπτου στο μήκος επαφής αποβλίπτου h_{cp} .

Λαμβάνοντας υπόψη τις καθορισμένες ιδιότητες αντοχής του υλικού της επικάλυψης σε σχέση με το πάχος της, μέσω της FEM προσομοίωσης της διαδικασίας φραιζαρίσματος όπως προαναφέρθηκε, μπορούν με ακρίβεια να προσεγγιστούν οι κατανομές τάσεων στην επικάλυψη κατά την αφαίρεση υλικού. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι κατανομές των τάσεων που αναπτύσσονται στις επικαλύψεις με διαφορετικές ιδιότητες μηχανικής αντοχής.

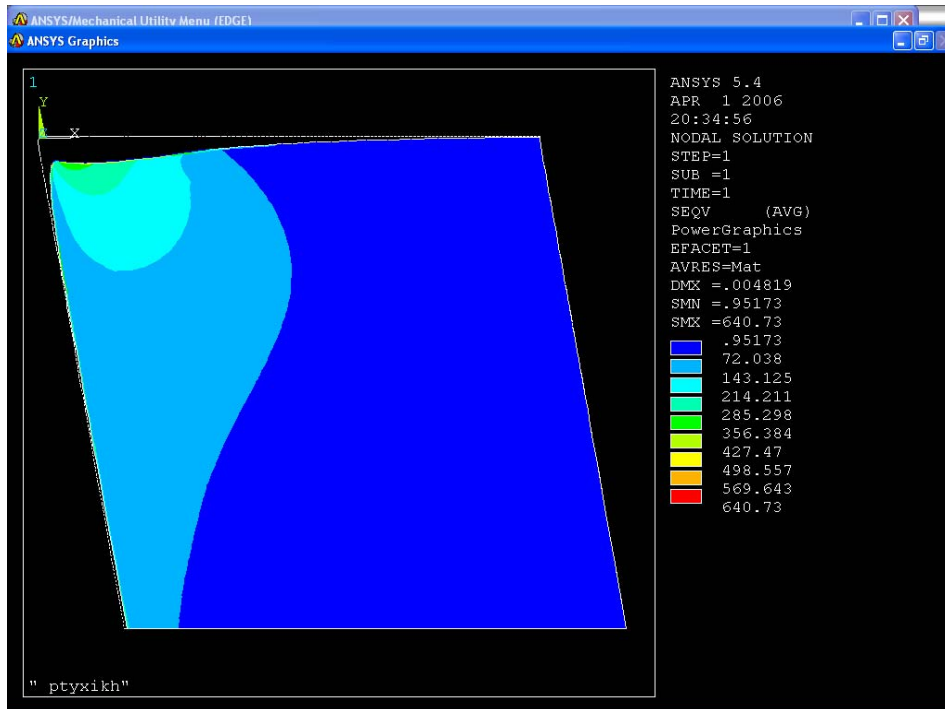
FEM προσομώση της επικάλυψης



Κατανομές τάσεων λαμβάνοντας υπόψη υποθετικές τιμές δυνάμεων

Στο σχήμα οι κατανομές των τάσεων που φαίνονται, δείχνουν ότι η περιοχή υπερφόρτισης στη συγκεκριμένη περίπτωση προχωράει σε μεγάλο βάθος στην επικάλυψη, με αποτέλεσμα να αναμένεται μια πιθανή μεγάλη αστοχία της επικάλυψης στην περιοχή της κοπτικής ακμής.

Πειραματικά αποτελέσματα



Στο παραπάνω σχήμα εκφράζετε η πρόοδος της ισοδύναμης κατά Von Mises τάση στο επικαλυμμένο κοπτικό εργαλείο από σκληρομέταλλα, σε διαδοχικές περιστροφές κατά τη διείδυση στο τεμάχιο κατεργασίας. Μπορεί να φανεί ότι όσο το πάχος του αποβλίπτου μεγαλώνει, το τασικό πεδίο μειώνεται και η μέγιστη τάση μειώνεται. Ο λόγος για τη συμπεριφορά αυτή είναι ότι ενόσω το πάχος αποβλίπτου μεγαλώνει, η επιφάνεια επαφής μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του τεμαχίου κατεργασίας γίνεται μεγαλύτερη,. Με τη λογική αυτή οι μέγιστες τάσεις αναμένονται να είναι στην έξοδο του εργαλείου από το τεμάχιο μετά από κάθε εισχώρηση. Η πιο ευάλωτη θέση για φθορά στην περίπτωση αυτή του επικαλυμμένου κοπτικού από σκληρομέταλλο είναι η περιοχή στην αρχή της καμπυλωμένης επιφάνειας ελευθερίας, λόγω της εκεί συγκέντρωσης τάσεων. Η επιφάνεια ελευθερίας δεν είναι κρίσιμη περιοχή μιας και οι εκεί αναπτυσσόμενες τάσεις είναι σχετικά μικρές. Οι καμπύλες τάσεων εισάγονται στο παραμορφωμένο μοντέλο το οποίο μεγεθύνεται κατά το μέγιστο για λόγους παρουσίασης.

Τα σκληρομέταλλα, θεωρώντας την δομή και σύστασή τους μπορεί να έχουν ανισοτροπική και ανομοιογενή συμπεριφορά. Με αυτή τη λογική η υπό τάση και συμπίεση αντοχή τους διαφέρει από τα κριτήρια αστοχίας von Mises

Με το δεδομένο αυτό οι κατασκευαστές δίνουν σημασία στη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου ώστε να αποφύγουν συγκεντρώσεις υψηλών τάσεων, ειδικά εφελκυστικές, ικανές να επιφέρουν ψαθυρές μικρορωγμές στην κοπτική ακμή που μπορεί να χειροτερεύσουν την απόδοση του εργαλείου. Στο πρώτο στάδιο των προσωμειώσεων με υπόστρωμα από σκληρομέταλλα, επικαλυμμένα κοπτικά εργαλεία χρησιμοποιήθηκαν έχοντας μια σχετικά αιχμηρή κοπτική ακμή, με ακτίνα καμπυλότητας 4 μm . Για την περίπτωση αυτή, τα πειραματικά αποτελέσματα απεικονίζουν μια πρόωρη αστοχία της κοπτικής ακμής, οφειλόμενη σε λόγους που εξηγήθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, επιλέχθηκε μεγαλύτερη διάμετρος και σταθερότητα της κοπτικής ακμής βελτιώθηκε.

Η υψηλή συγκέντρωση τάσεων στην ελεύθερη επιφάνεια και μια αντίστοιχη στην επιφάνεια αποβλίπτου, παράγει ένα υψηλό πεδίο κάμψης της κοπτικής ακμής το οποίο οδηγεί σε ένα πολύ πρόωρο στάδιο αριθμών κοπής. Αυτές οι συγκεντρώσεις υψηλών κύριων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων κατά Mises μπορούν να φανούν από τις αντίστοιχες καμπύλες. Αυτή η κατανομή τάσεων, οδηγεί σε αστοχία της κοπτικής ακμής, όμοια με την αντίστοιχη που παρουσιάστηκε στη φωτογραφία του ίδιου σχήματος.

Όταν εφαρμόζεται μια μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας στην κοπτική ακμή, τότε η κατανομή τάσεων αλλάζει εμφανίζοντας μόνο ένα μέγιστο κοντά στην αρχή της καμπυλωμένης επιφάνειας ελευθερίας (βλέπε δεξιό μέρος του σχήματος). Το μέγιστο αυτό αποτελείται κυρίως από συμπιεστικές κύριες τάσεις, οι οποίες όμως δεν είναι τόσο κρίσιμες για τα σκληρομέταλλα. Τα προαναφερθέντα αποτελέσματα τάσεων αποδεικνύουν ικανοποιητικά την ήδη γνωστή εμπειρία του σχηματισμού καμπυλότητας στις κοπτικές ακμές, ώστε να επιτευχθεί μια σταθερή συμπεριφορά στην κοπή. Όπως φαίνεται στη φωτογραφία του ίδιου σχήματος για το κοπτικό εργαλείο γεωμετρίας που αντιστοιχεί σε αυτήν της προηγούμενης γεωμετρίας, αλλά με μια ικανοποιητική καμπυλότητα 10 μm , η κοπτική ακμή μπορεί αν αντέξει ένα μεγάλο αριθμό κοπών χωρίς ζημιά. Οι συνθήκες κοπής στην περίπτωση αυτή ήταν ίδιες με αυτές για το πλακίδιο με αιχμηρή ακμή. Η προσομοίωση της κοπτικής ακμής κατάφερε να δώσει τις αναπτυσσόμενες τάσεις που οδηγού σε αστοχία.

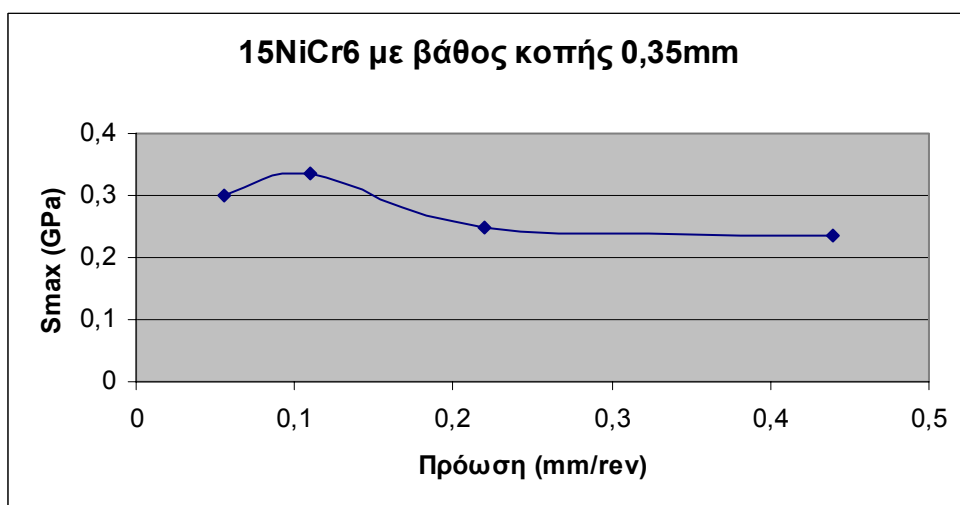
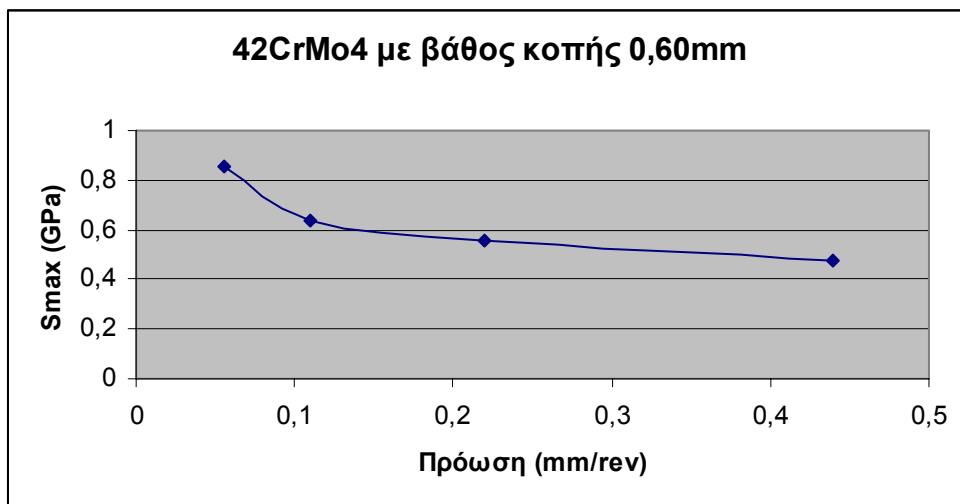
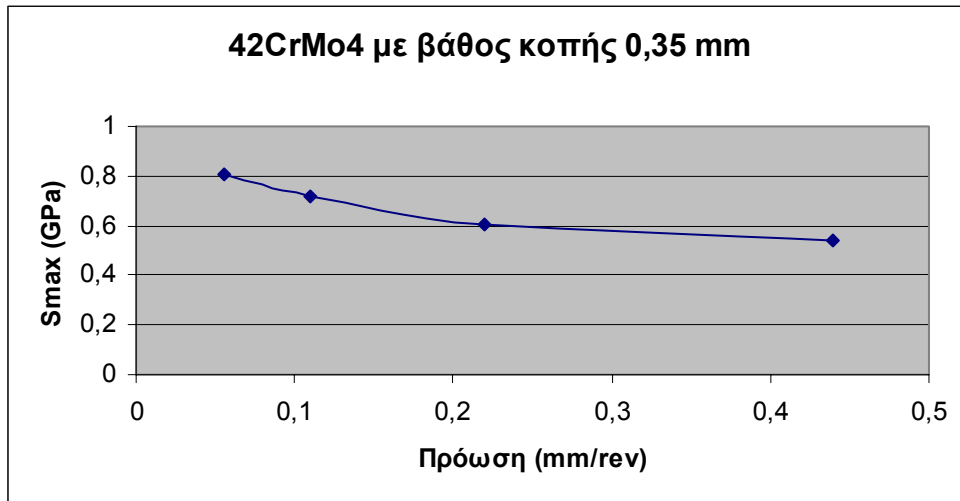
Αποτελέσματα

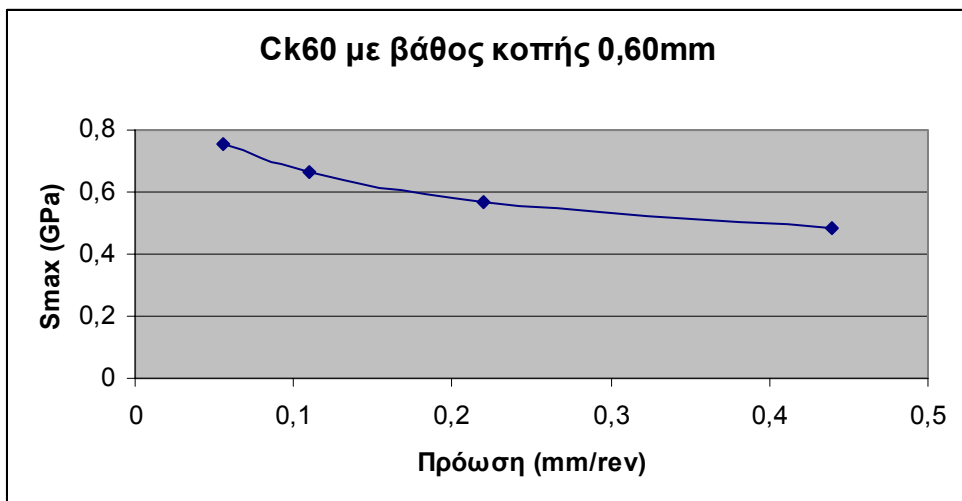
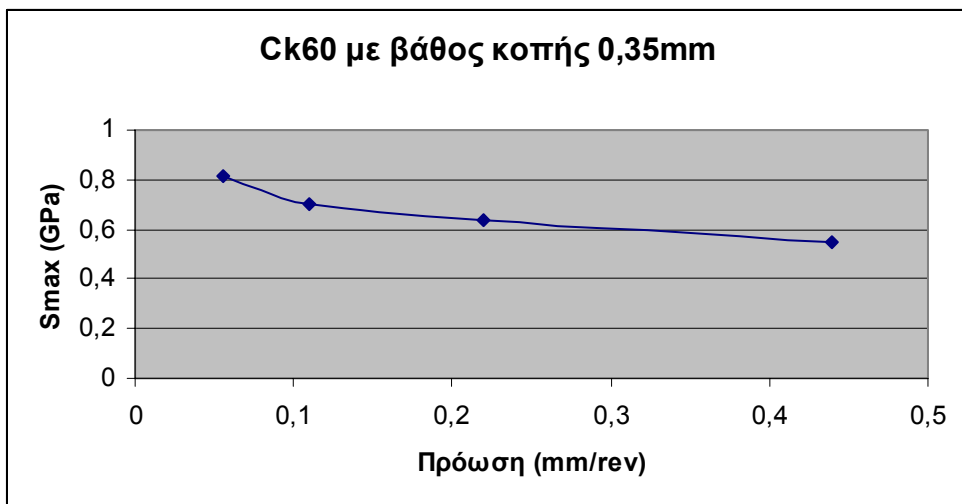
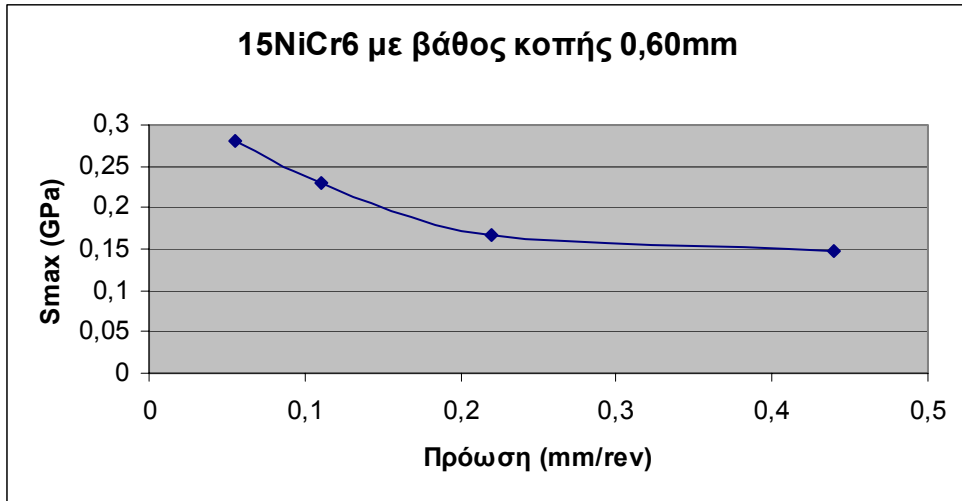
Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας εξετάζεται πειραματικά κατά το τρνάρισμα και αναλυτικά μέσω προσομείωσης της κοπής με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην κοπτική ακμή. Οι καμπύλες τάσεις - παραμόρφωσης προσδιορίστηκαν με αξιολόγηση των μετρηθέντων δυνάμεων, που υπολογίστηκαν μέσω της πειραματικής διάταξης και αναφέρονται αναλυτικά σε παραπάνω κεφάλαιο.

Παρακάτω αναγράφονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δυνάμεων - τάσεων - μετατοπίσεων όπως πάρθηκαν μετά από την προσομείωση στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων :

Βάθος κοπής (mm)	Πρόωση (mm/rev)	FZ (N)	FY (N)	FX (N)	FK (N)	Smax (Gpa)	Dmax (mm)
42CrMo4							
35	0,055	81,68288	44,61783	40,74341	60,42165	0,802711	0,003122
35	0,11	147,4866	92,84597	63,31916	112,3819	0,714984	0,00598
35	0,22	246,8089	146,8867	78,14669	166,3809	0,60881	0,00919
35	0,44	437,1611	248,3936	100,9785	268,1344	0,537056	0,016279
60	0,055	149,7758	67,09038	92,82119	114,529	0,852481	0,003362
60	0,11	221,241	93,42743	118,2654	150,7163	0,64073	0,004819
60	0,22	377,1781	151,4	171,5074	228,7723	0,554294	0,008272
60	0,44	626,731	230,4797	180,554	292,7809	0,473436	0,015331
15NiCr6							
35	0,055	12,73556	16,57636	11,04806	19,92073	0,300577	0,00115
35	0,11	20,94919	34,04273	21,70607	40,37401	0,335581	0,00273
35	0,22	30,95853	50,96059	26,11703	57,26326	0,249607	0,003961
35	0,44	56,33021	96,52815	39,50884	104,3007	0,234113	0,007425
60	0,055	18,23846	23,10941	21,16907	31,33966	0,281665	0,001106
60	0,11	26,83498	35,43638	32,03414	47,76948	0,230765	0,001815
60	0,22	38,08899	52,00433	41,71406	66,66718	0,167615	0,002616
60	0,44	66,94837	99,24057	58,0341	114,9637	0,148159	0,004593
Ck60							
35	0,055	74,15476	39,14799	29,90516	49,26341	0,814843	0,002966
35	0,11	128,1099	67,09957	49,14959	83,17472	0,702347	0,005032
35	0,22	236,7155	140,6064	77,93867	160,7625	0,63824	0,009127
35	0,44	403,6209	233,3874	80,6263	246,9216	0,544855	0,011575
60	0,055	117,3947	45,20739	63,70192	78,11301	0,752261	0,002738
60	0,11	213,3233	94,83746	121,8127	154,3777	0,667356	0,004858
60	0,22	353,2768	149,1024	151,5809	212,6224	0,569069	0,008145
60	0,44	590,3854	236,5787	164,0551	287,895	0,485581	0,014868

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω μας δίνουν ένα μέτρο σύγκρισης της μέγιστης τάσης και της πρόωσης.





Όπως φαίνεται και από τα γραφήματα ενώ οι δυνάμεις κοπής αυξάνουν όσο αυξάνεται και η πρόωση εντούτοις η μέγιστες τάσεις ελατώνονται. Αυτό συμβαίνει γιατί αυξάνει μαζί με την πρόωση και η επιφάνεια επαφής του απαραμόρφωτου αποβλίπτου και αυτό έχει σαν συνέπεια η κατανομή των τάσεων να παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιομορφία. Ο λόγος του απαραμόρφωτου αποβλίπτου προς το παραμορφωμένο μας δίνει τον συντελεστή λ , συμπίεστότητα, από τον οποίο εξαρτάται η ενεργός επαφή του αποβλίπτου. Ο λογος (λ) εξαρτάται από την σκληρότητα του υλικού του τεμαχίου και αυξάνει όσο αυξάνει και σκληρότητα του υλικου Για τον **πειραματικό** προσδιορισμό του συντελεστή αυτού έγιναν μετρήσεις στα παραμορφωμένα απόβλιπτα και οι τιμές που βρεθήκαν παρουσιάζονται παρακάτω.

Υλικά Δοκιμίων	
15CrNi6	$\lambda=2,05$
CK60	$\lambda=2,15$
42CrMo4	$\lambda=2,35$

Υλικό	Σκληρότητα
15CrNi6	185HB
CK60	215HB
42CrMo4	300 HB

Συγκρίνοντας αυτούς του δύο πίνακες παρατηρούμε την σχέση της σκληρότητας και του λόγου (λ)

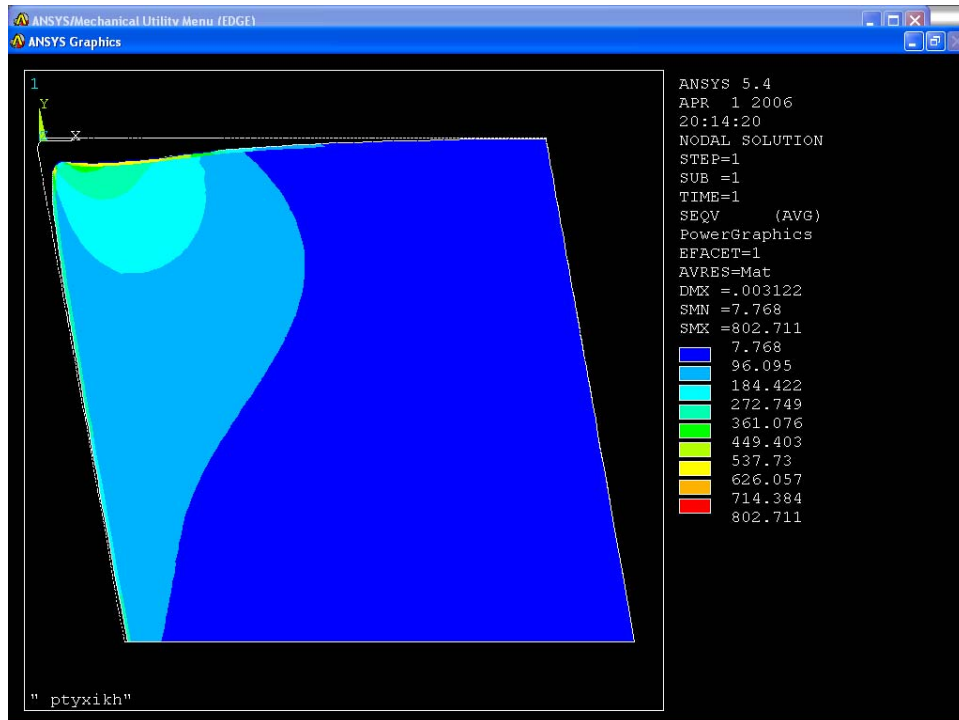
Στο γράφημα του 15CrNi6 παρατηρείται ότι μετά την πρώτη μετρημένη τιμή δύναμης παρουσιάζεται ασυνήθιστη αύξηση της μέγιστης τάσης το οποίο μπορεί να οφείλεται σε μετρητικό σφάλμα κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται ακριβώς οι φωτογραφίες της κατανομής τάσεων για κάθε υλικό σε συγκεκριμένες συνθήκες πρόωσης και βάθους κοπής όπως αναφέρονται στον πίνακα :

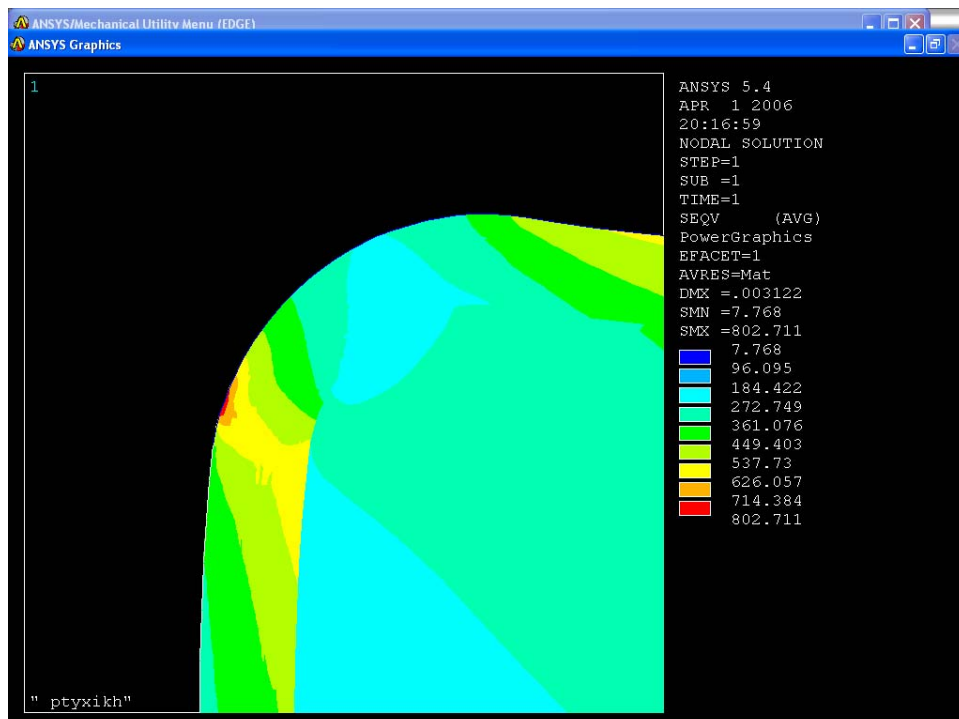
Συνθήκες κοπής

Αξονικό βάθος κοπής σε mm	0,35	Πρόωση σε mm/rev	0,055
			0,11
	0,60		0,22
			0,44
Ταχύτητα κοπής 50 m/min για όλα τα πειράματα			

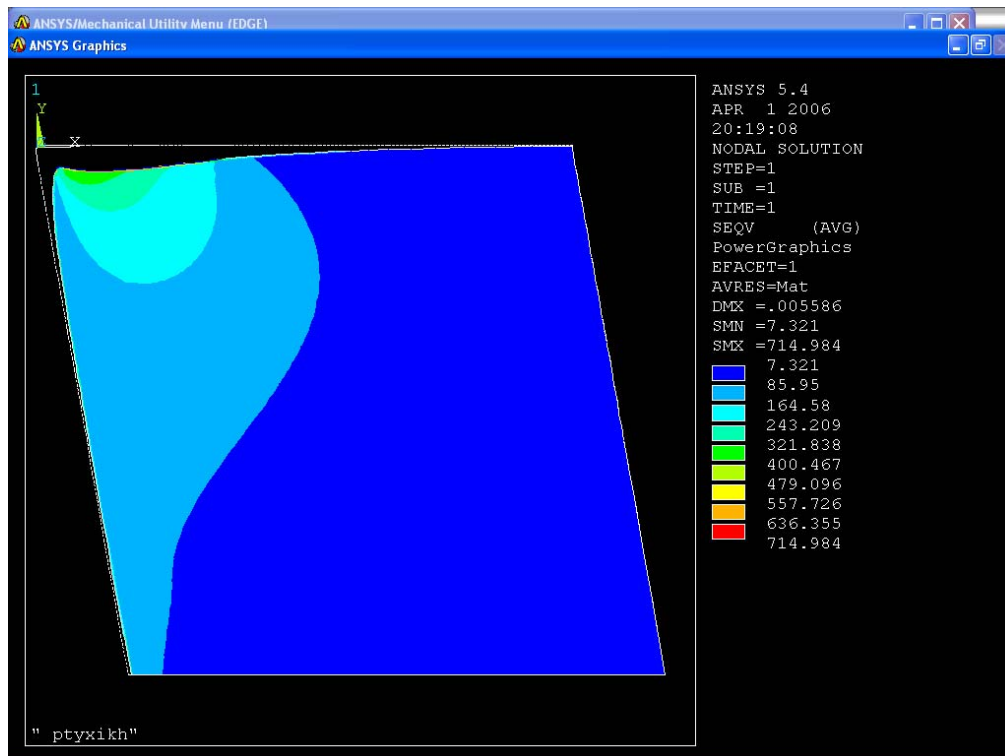
42CrMo4



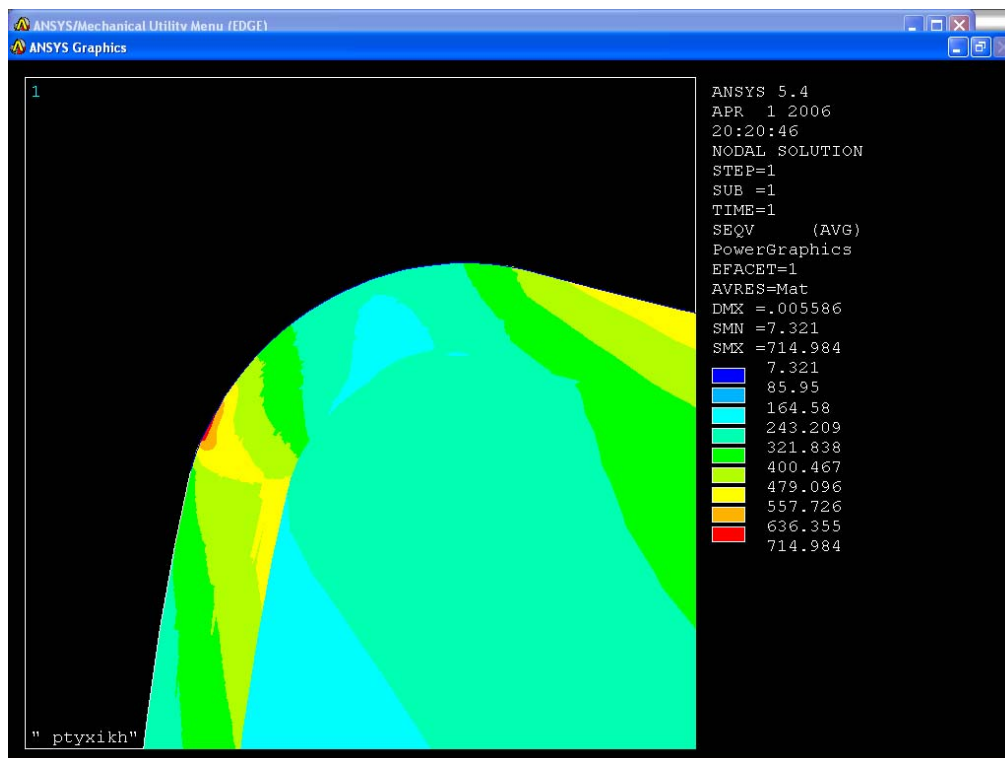
Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,055 mm/rev



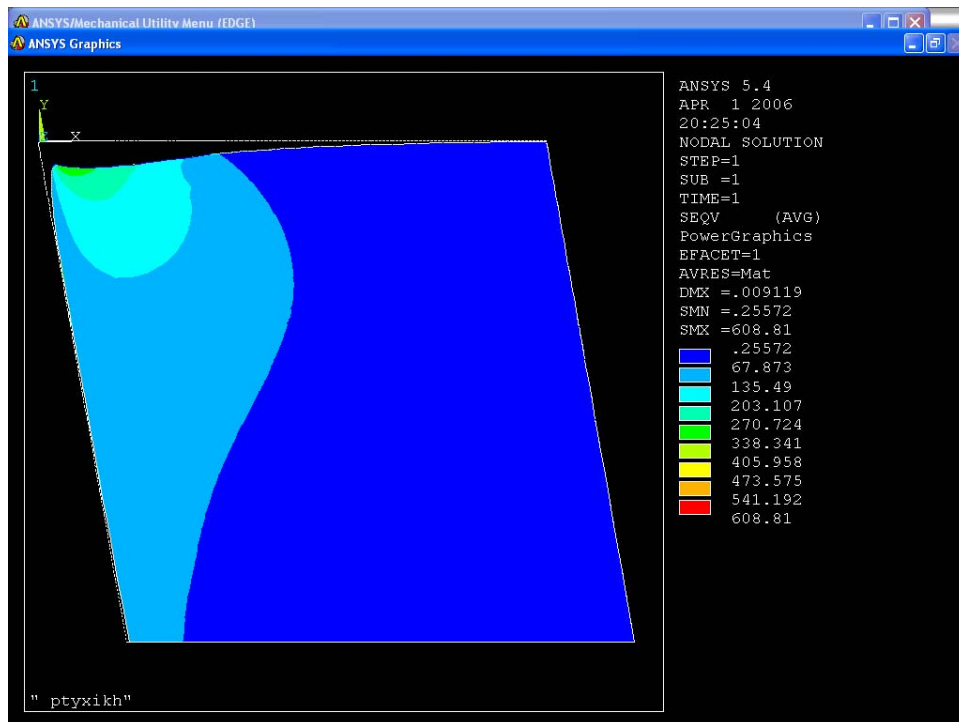
Λεπτομέρεια



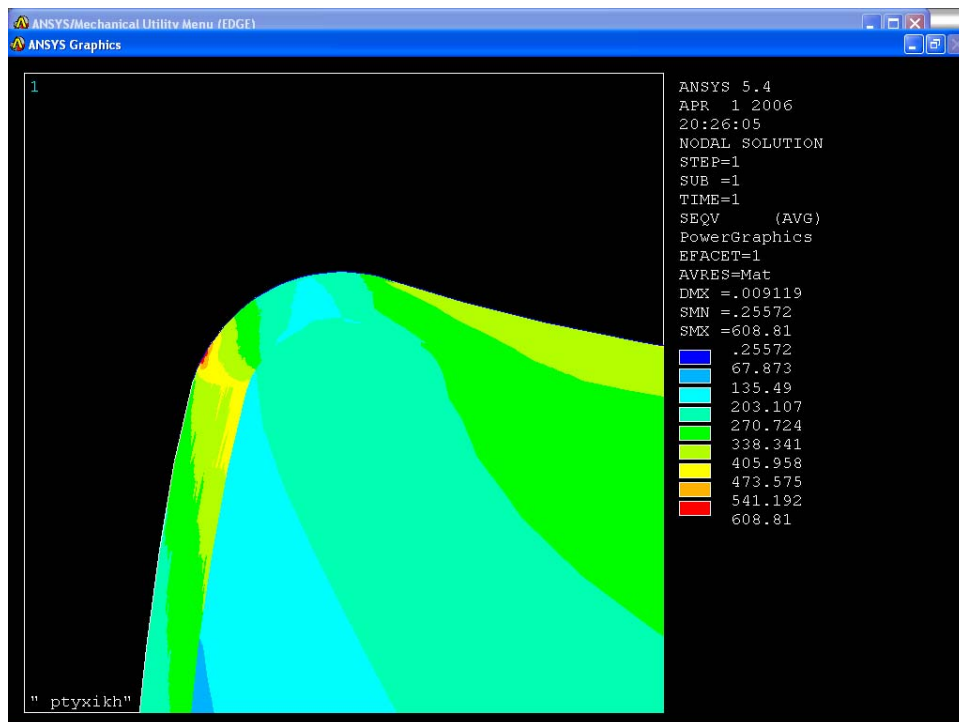
Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,11 mm/rev



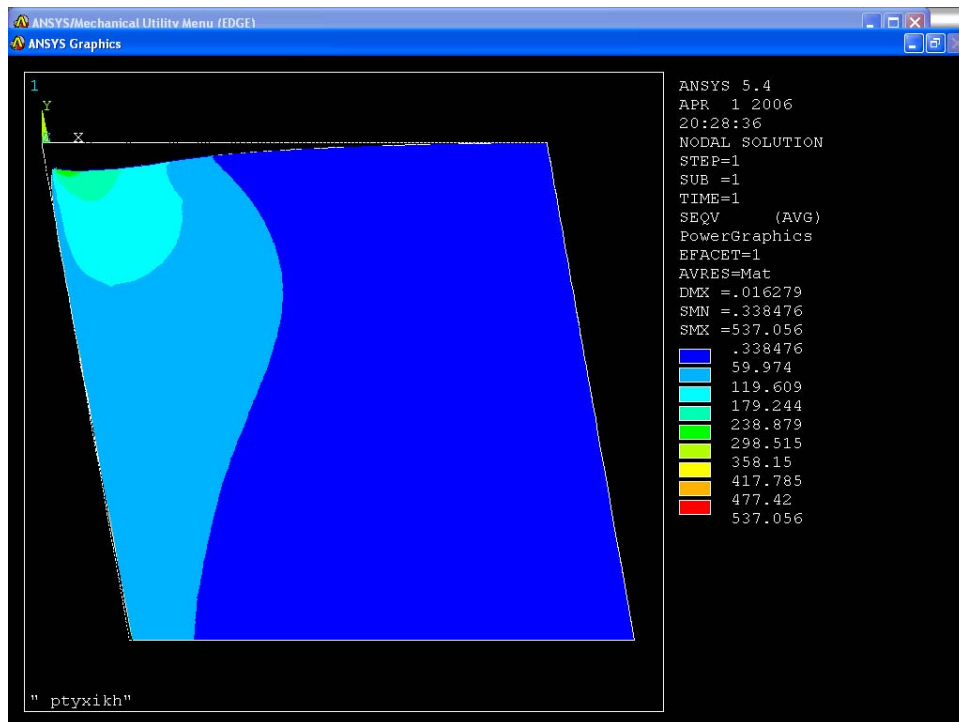
Λεπτομέρεια



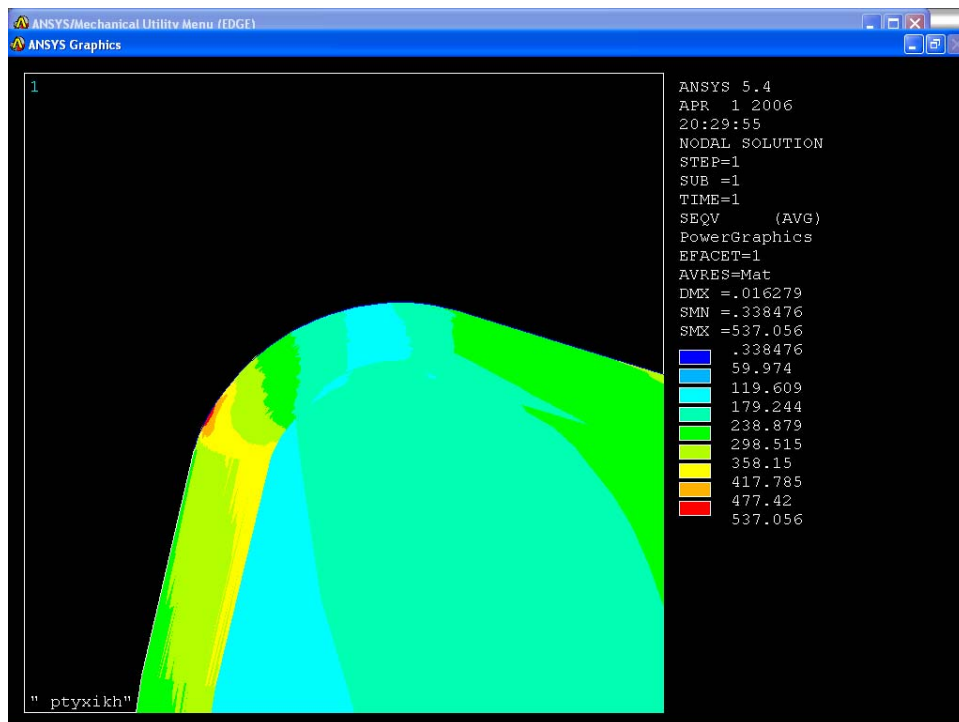
Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,22 mm/rev



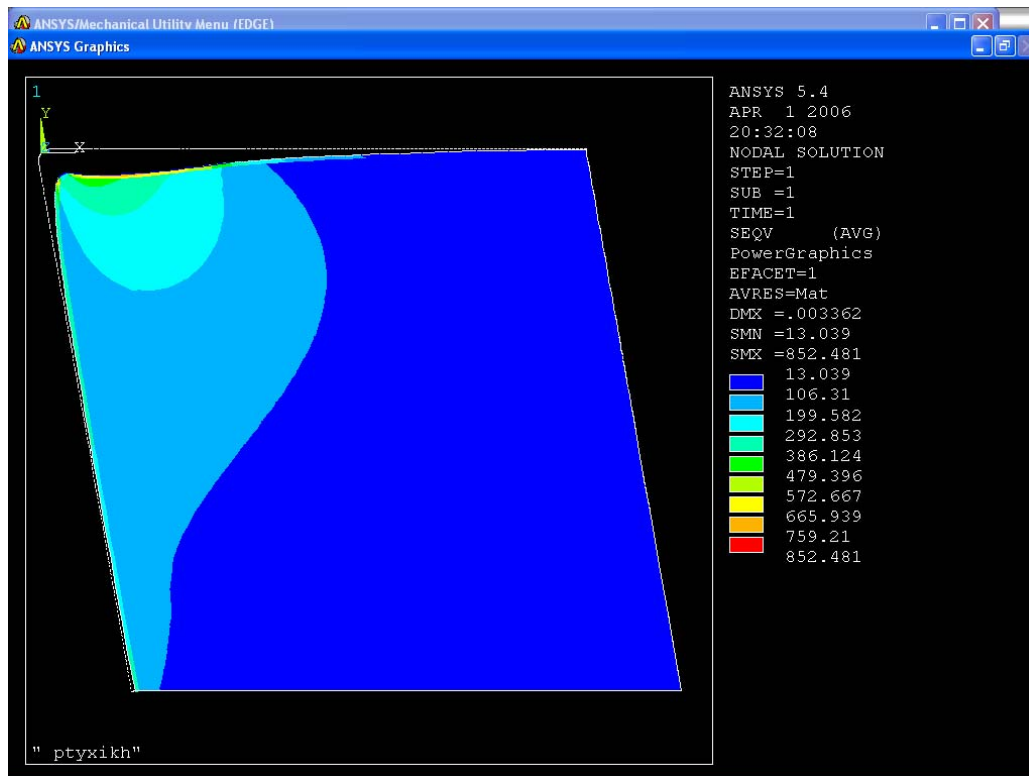
Λεπτομέρεια



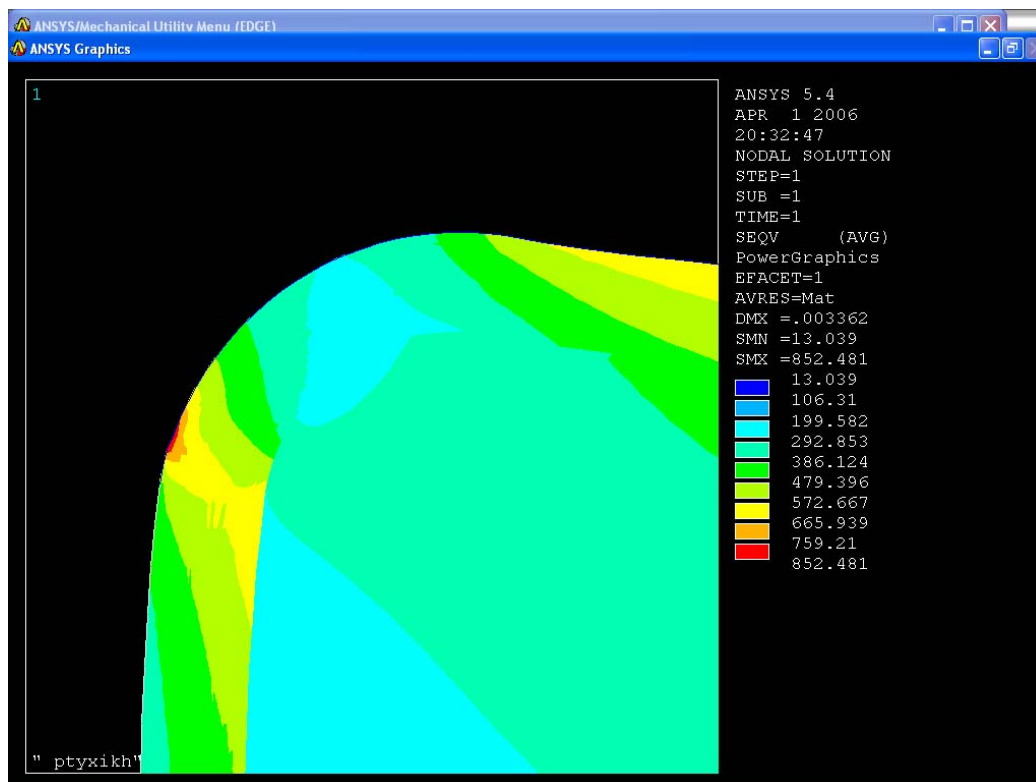
Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,44 mm/rev



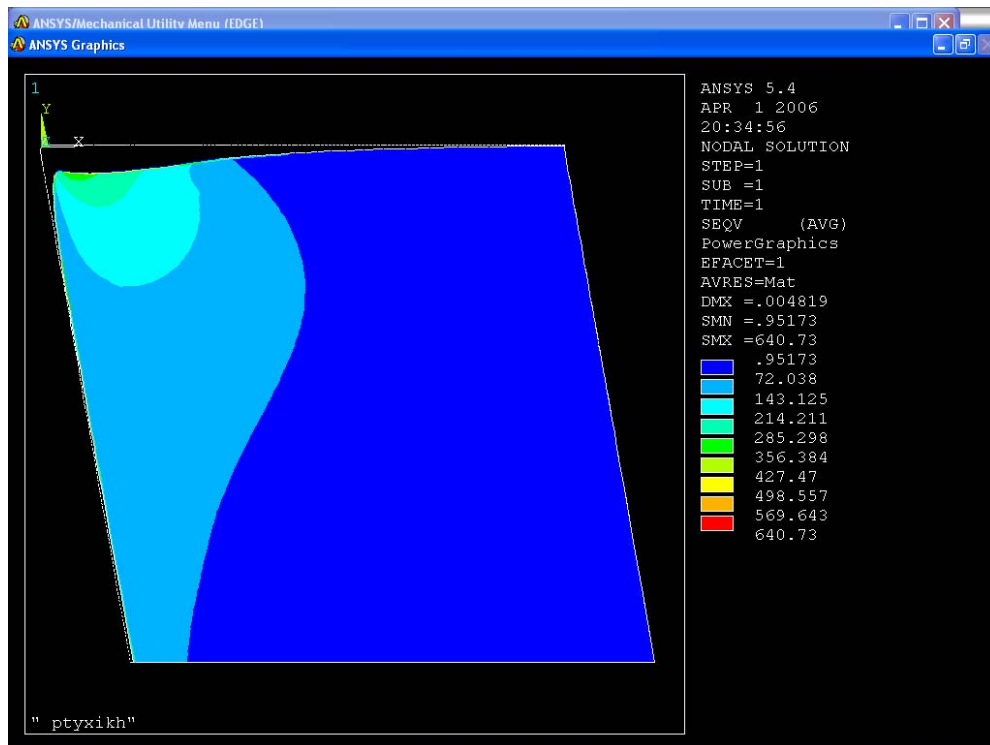
Λεπτομέρεια



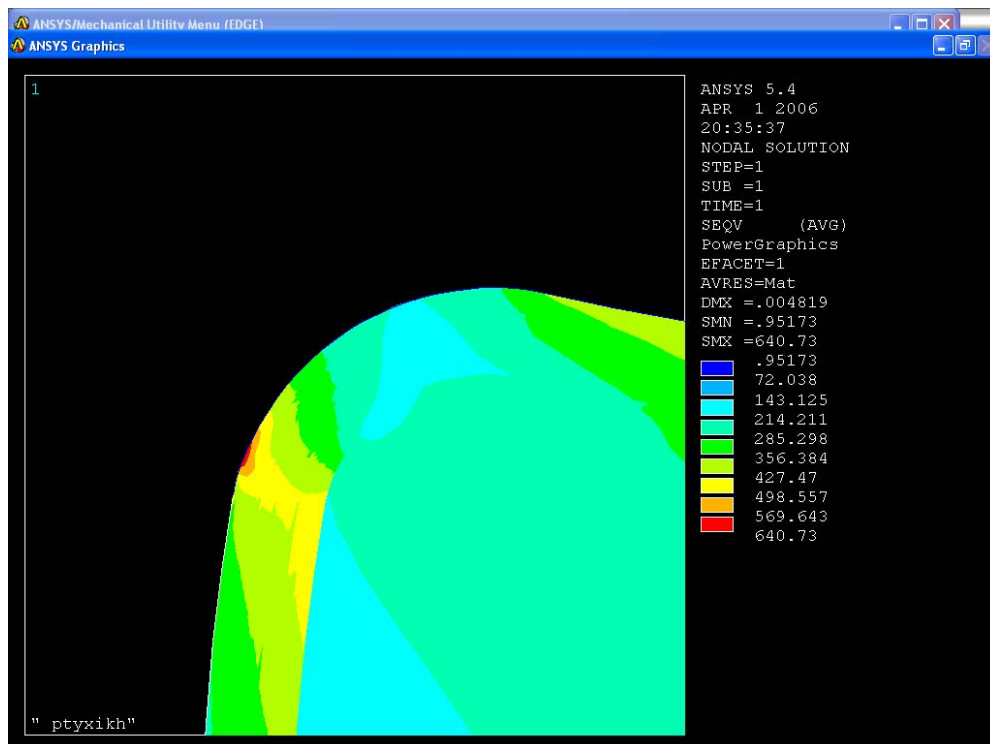
Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,055 mm/rev



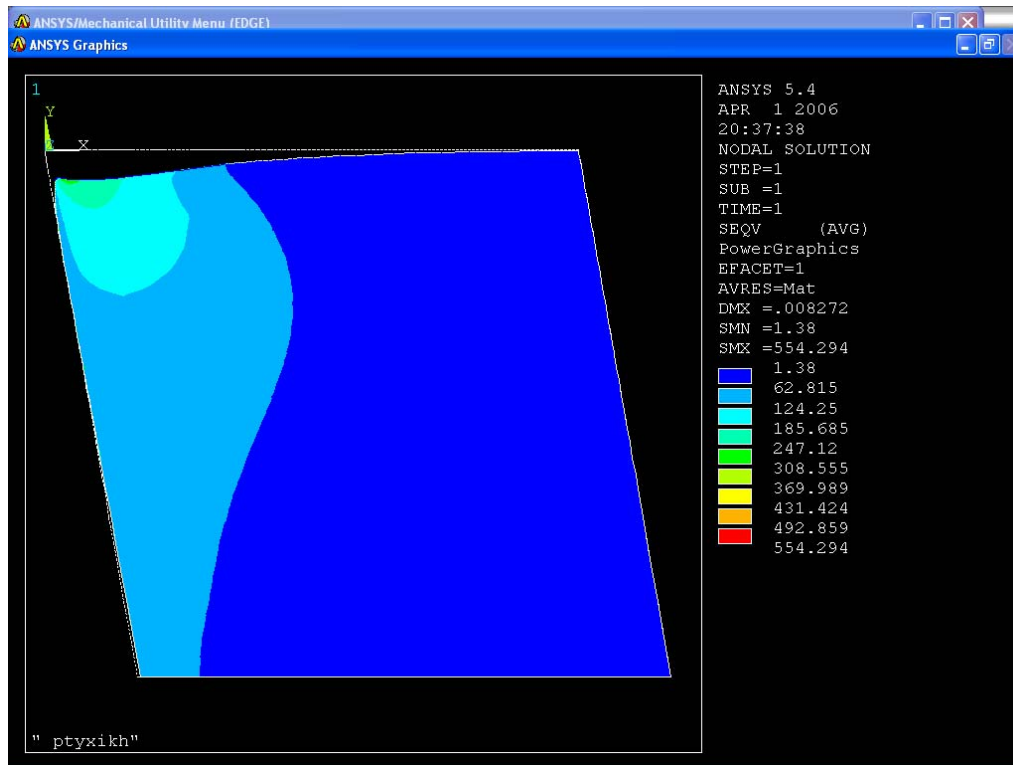
Λεπτομέρεια



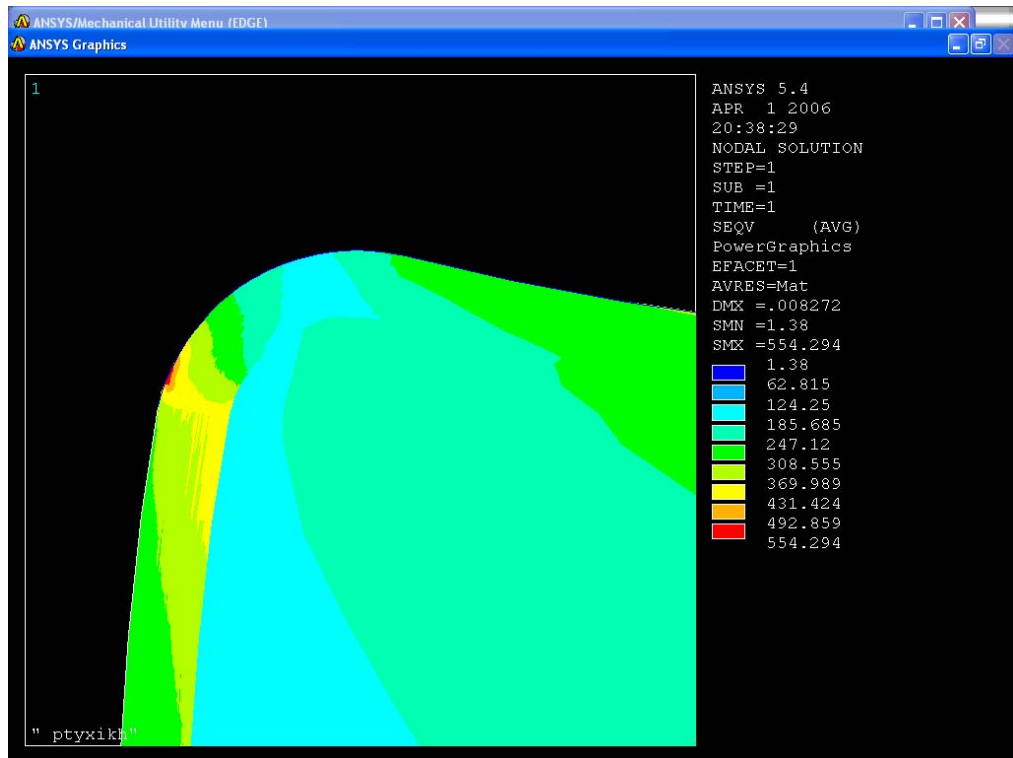
Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,11 mm/rev



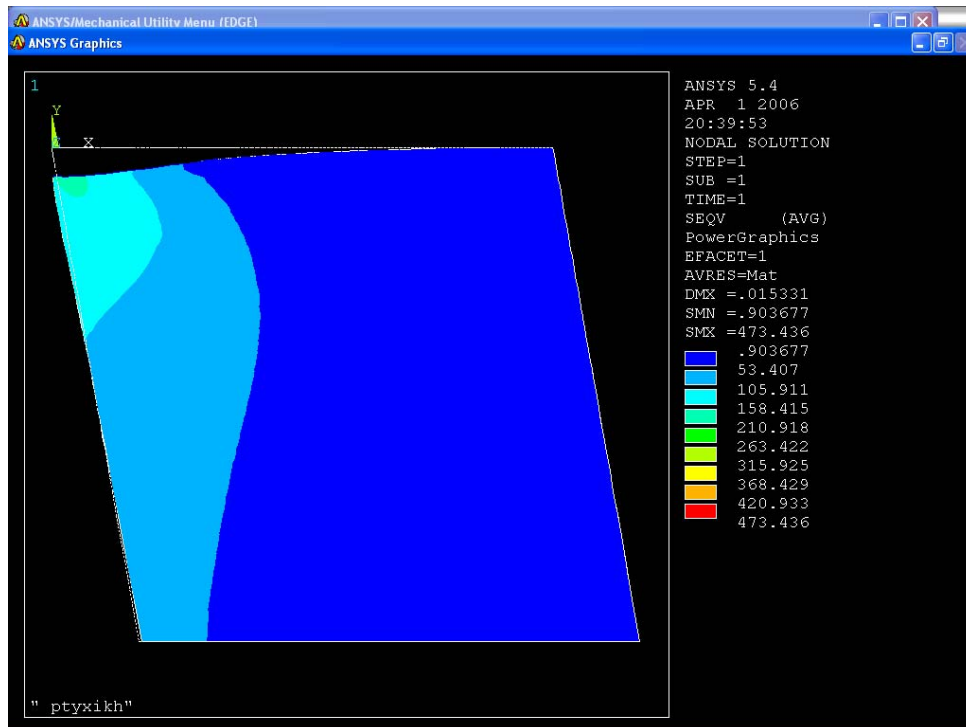
Λεπτομέρεια



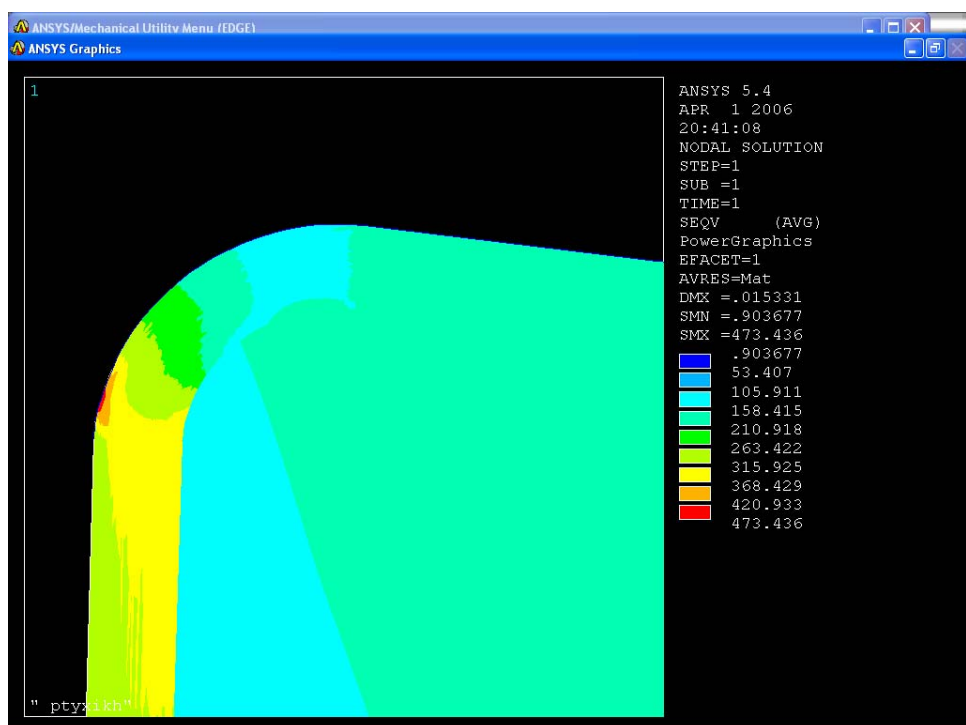
Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,22 mm/rev



Λεπτομέρεια

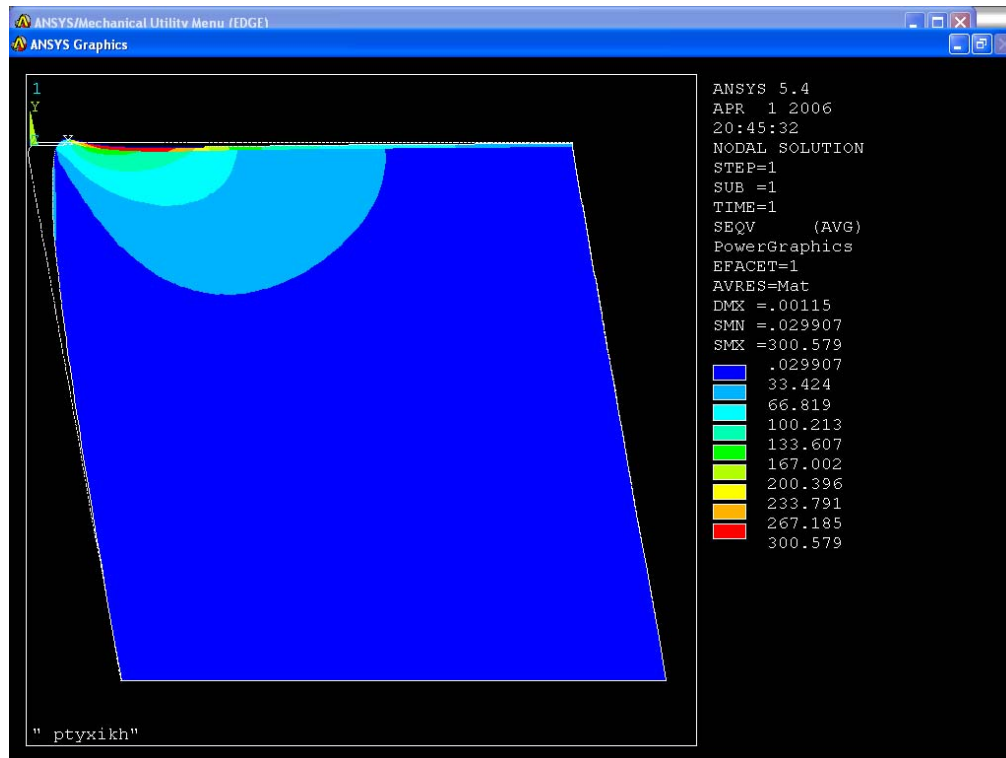


Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,44 mm/rev

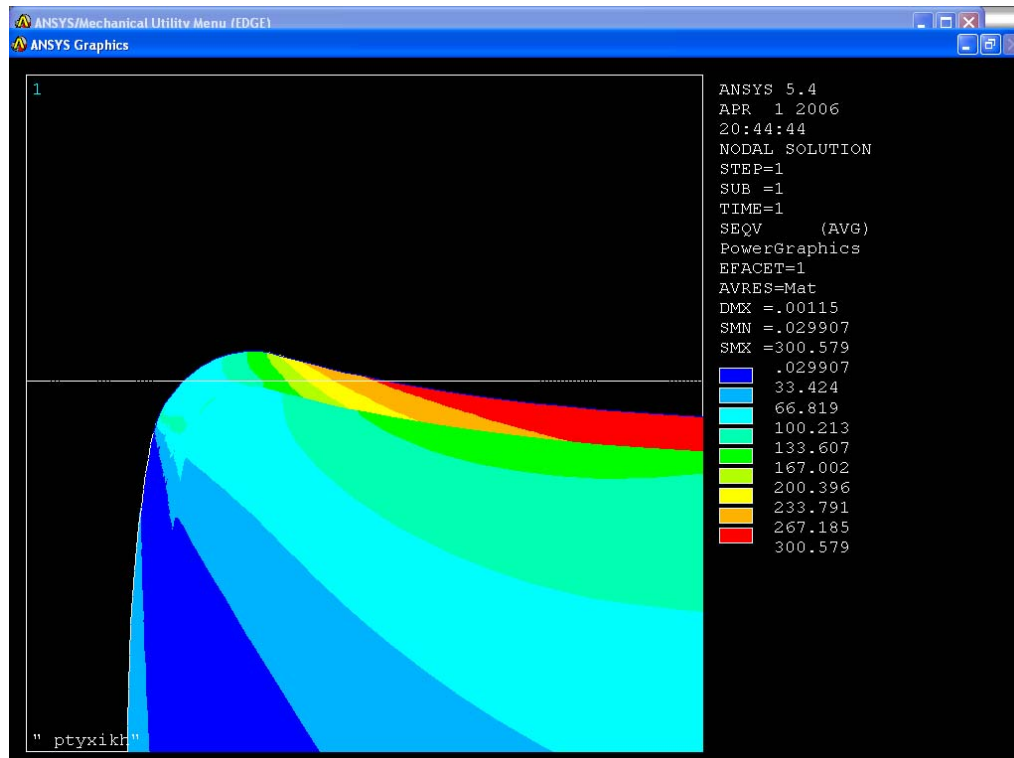


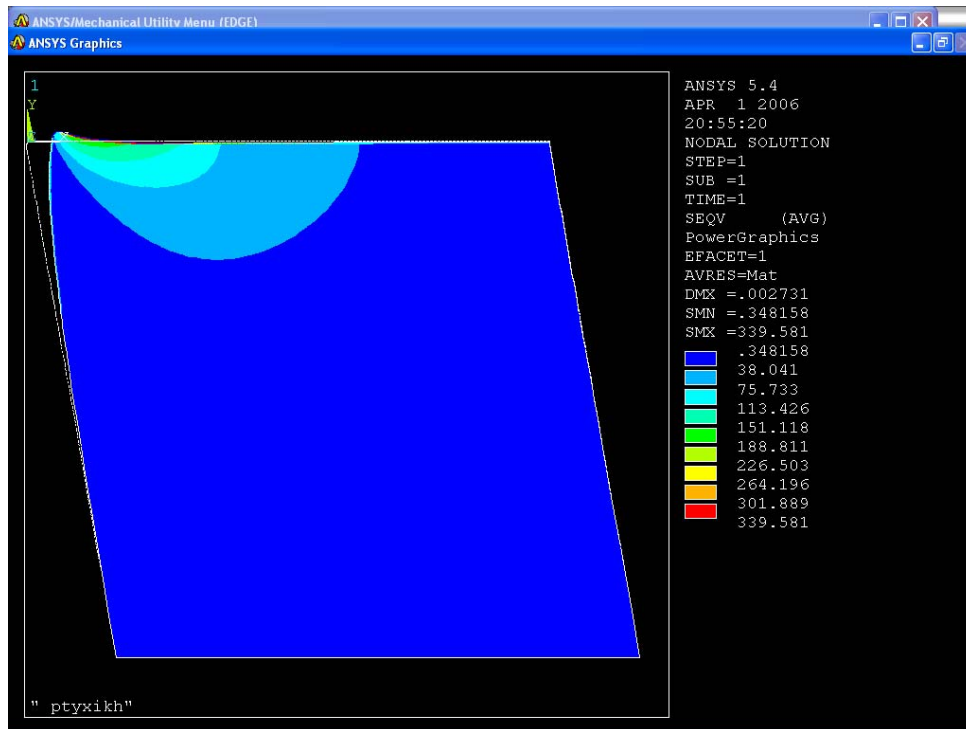
Λεπτομέρεια

15CrNi6

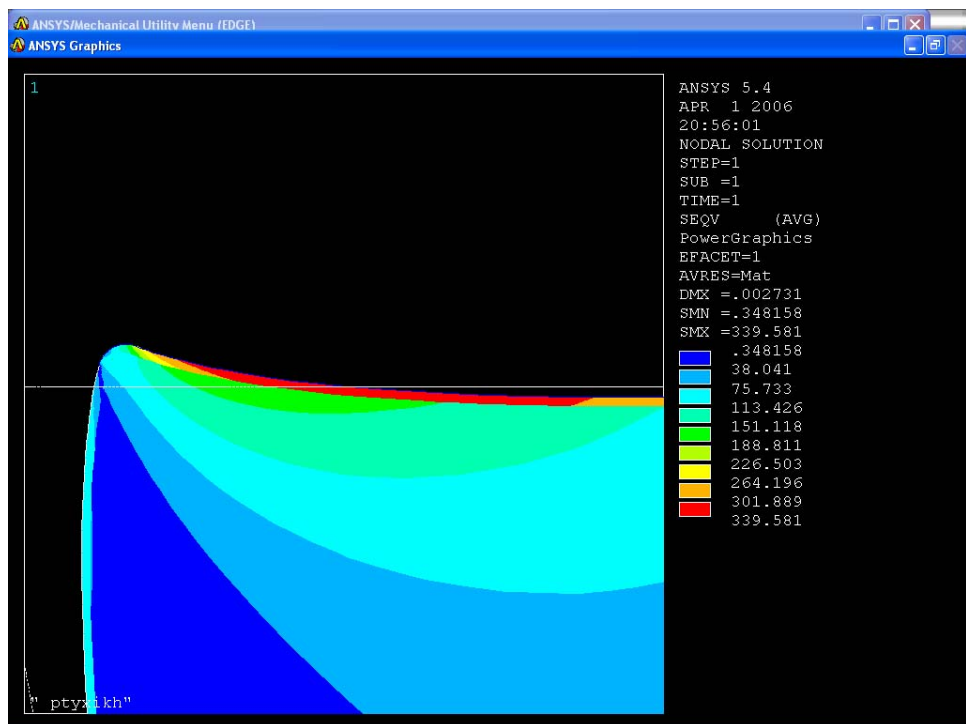


Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,055 mm/rev

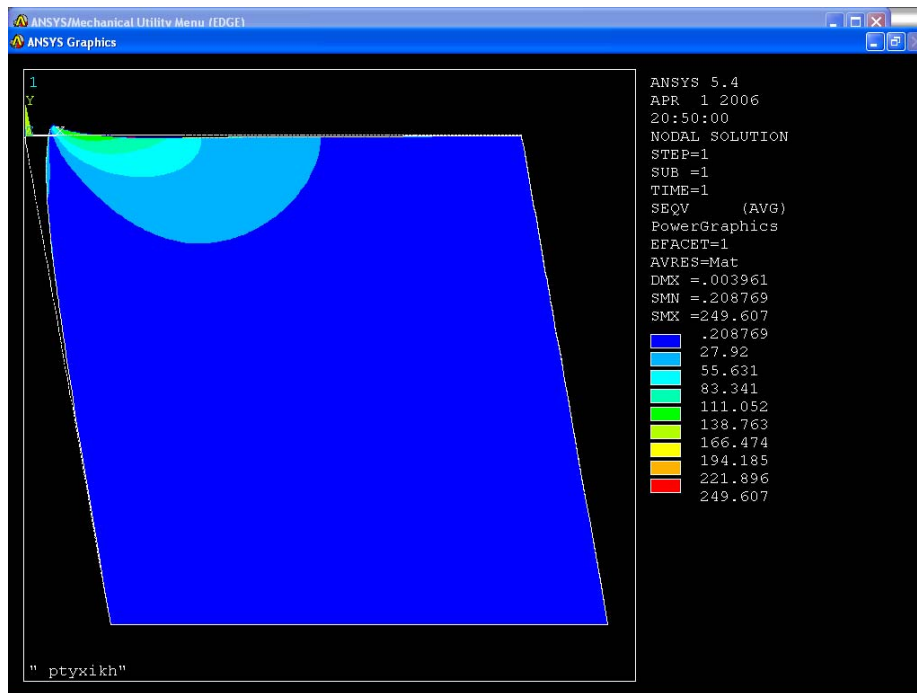




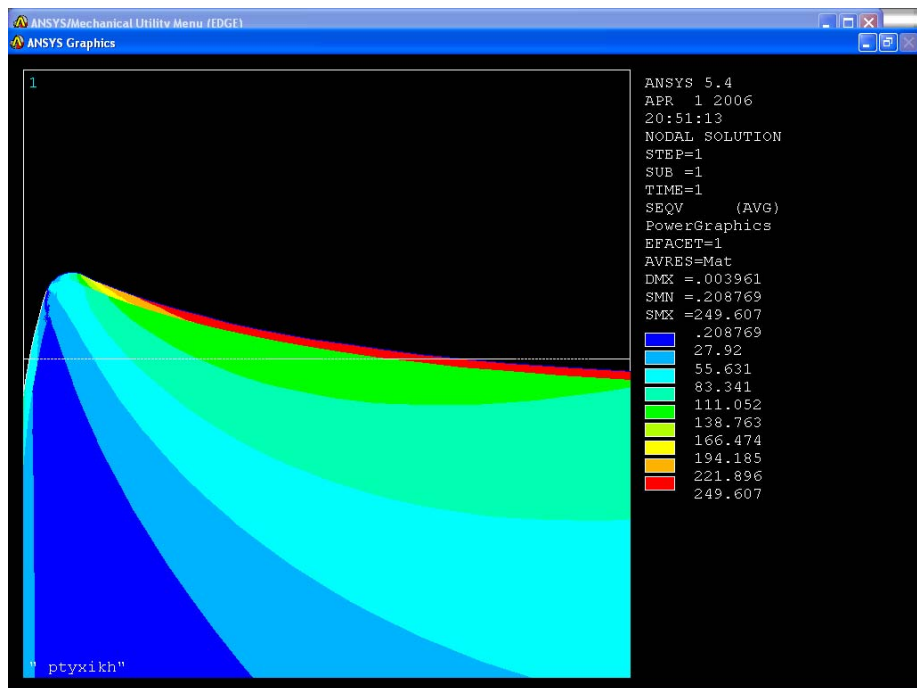
Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,11 mm/rev



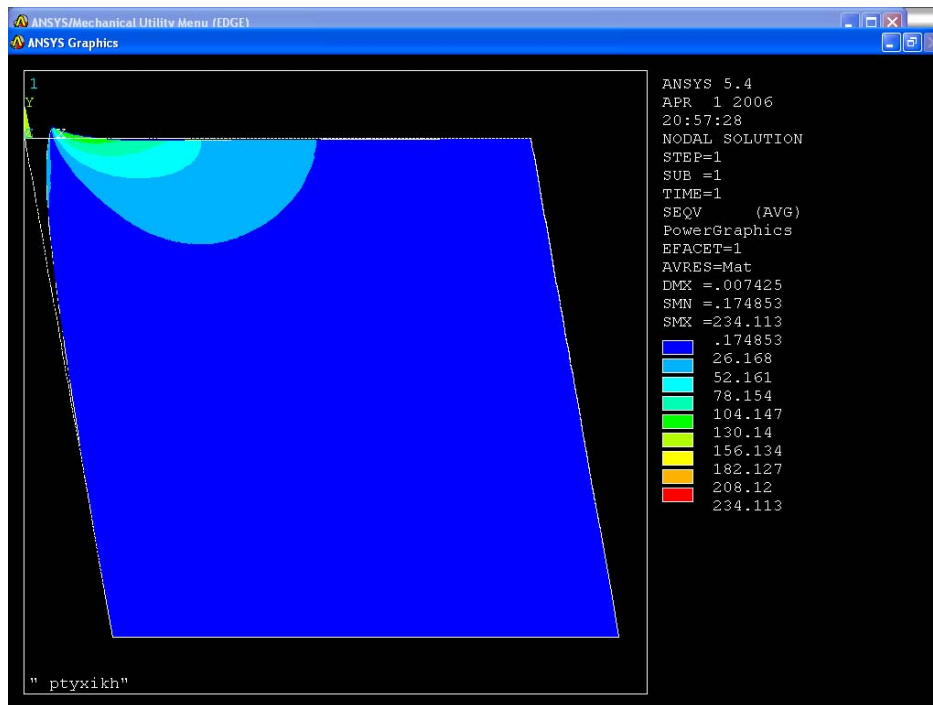
Λεπτομέρεια



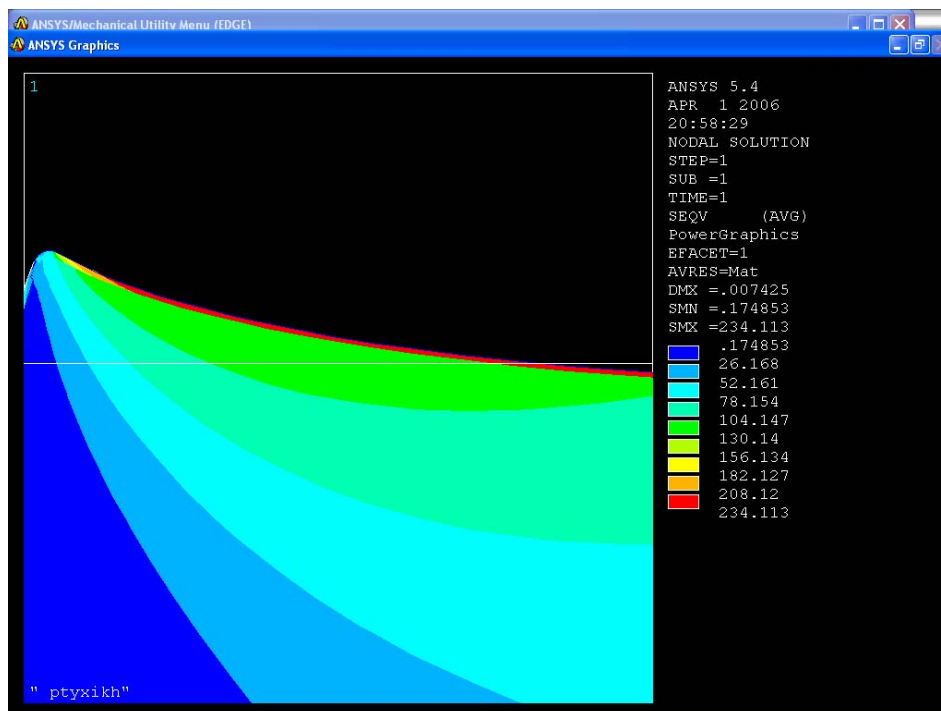
Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,22 mm/rev



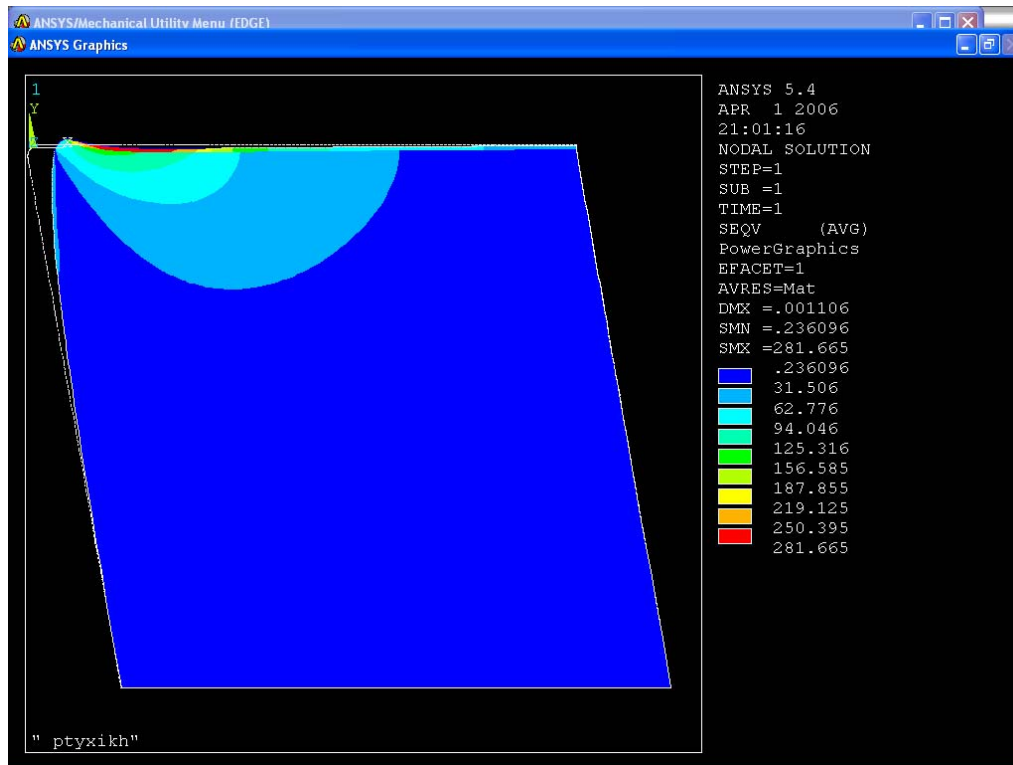
Λεπτομέρεια



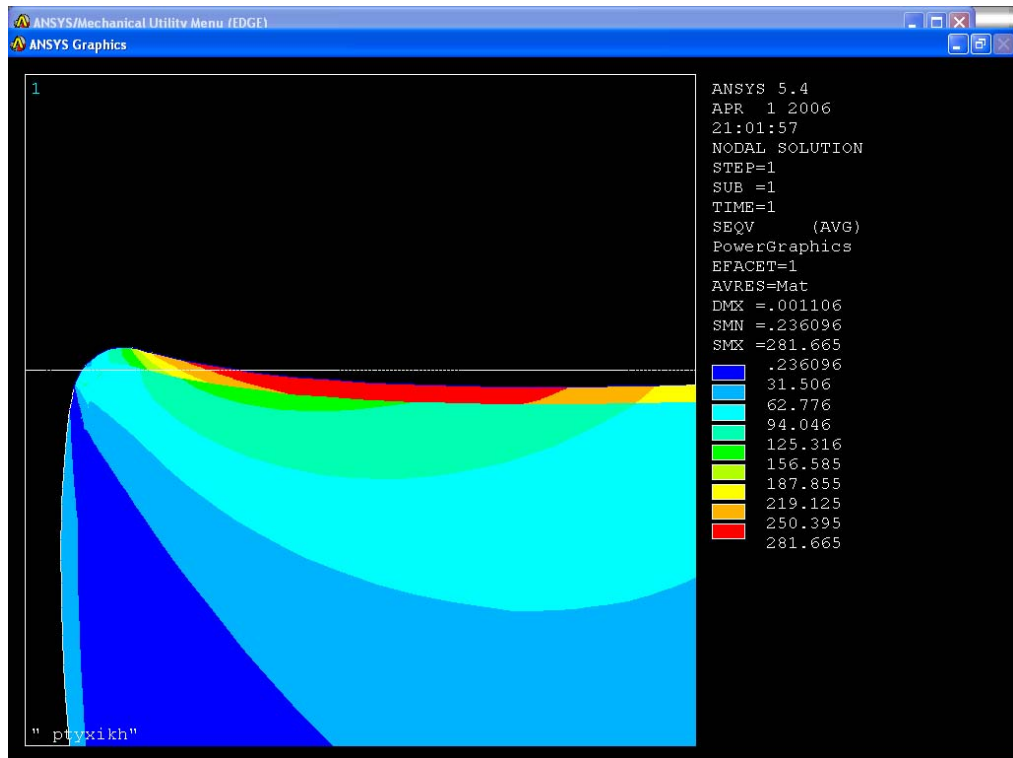
Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,44 mm/rev



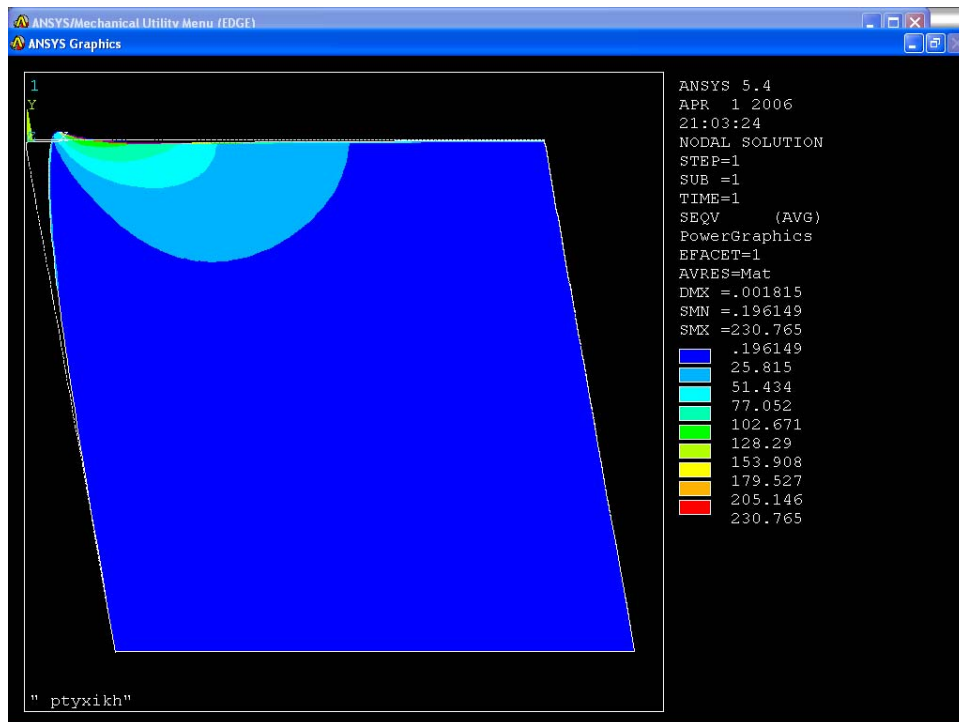
Λεπτομέρεια



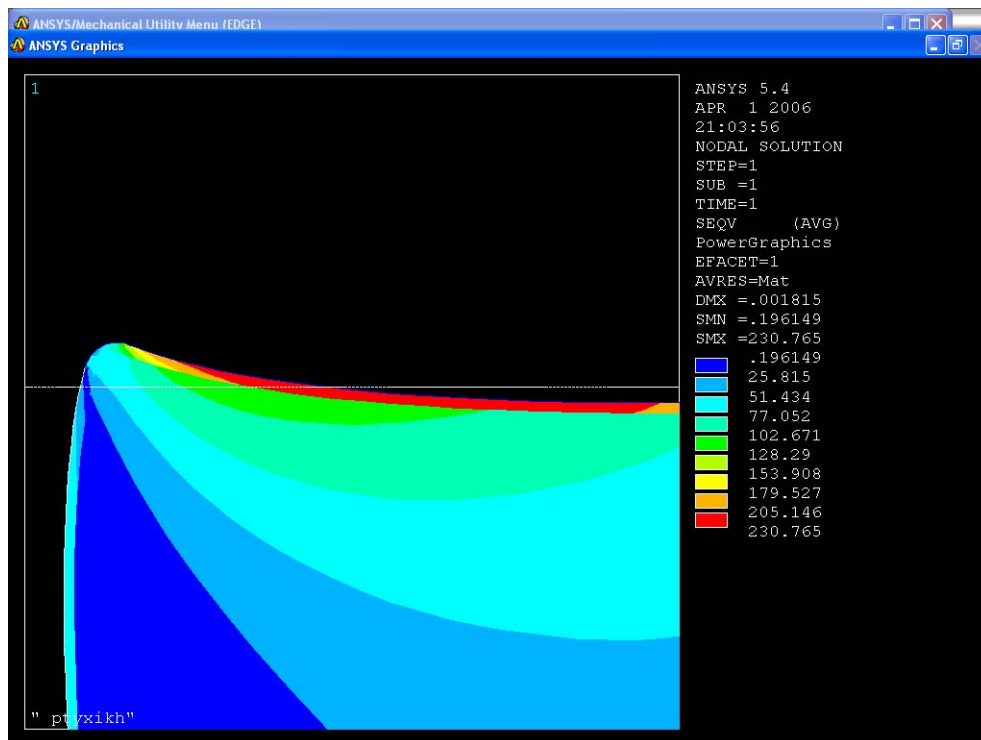
Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,055 mm/rev



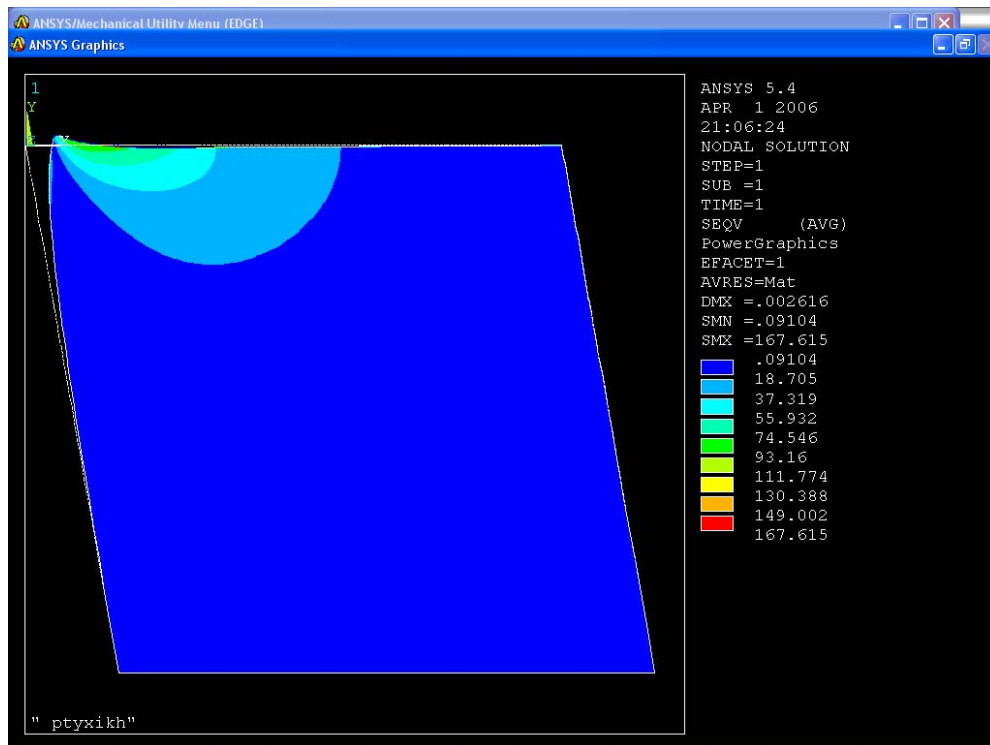
Λεπτομέρεια



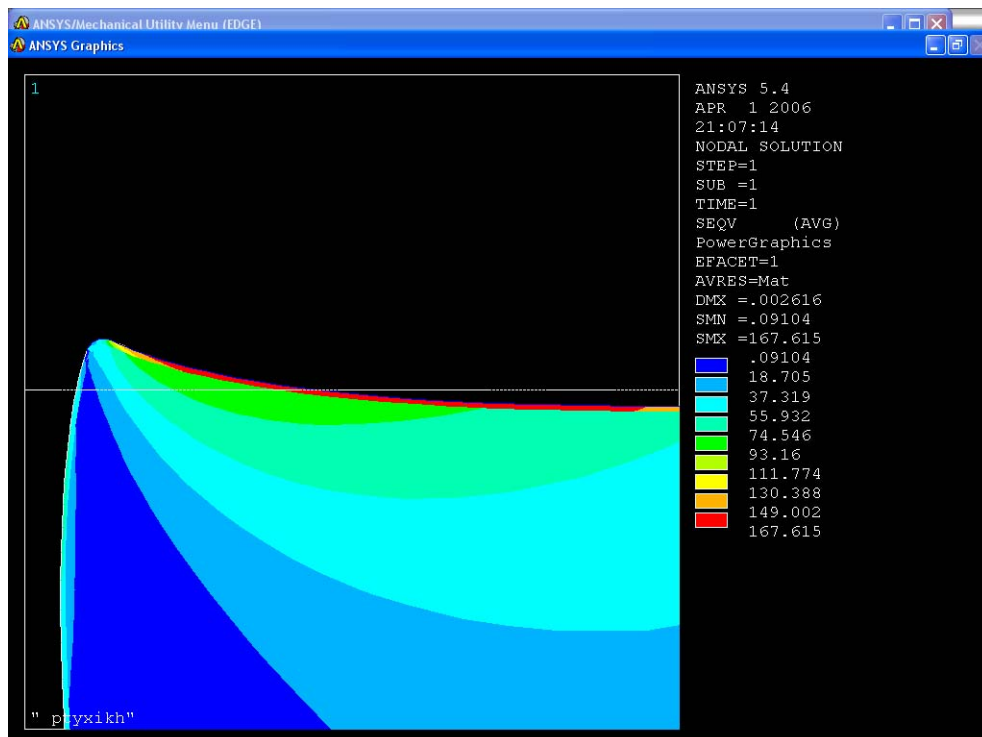
Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,11 mm/rev



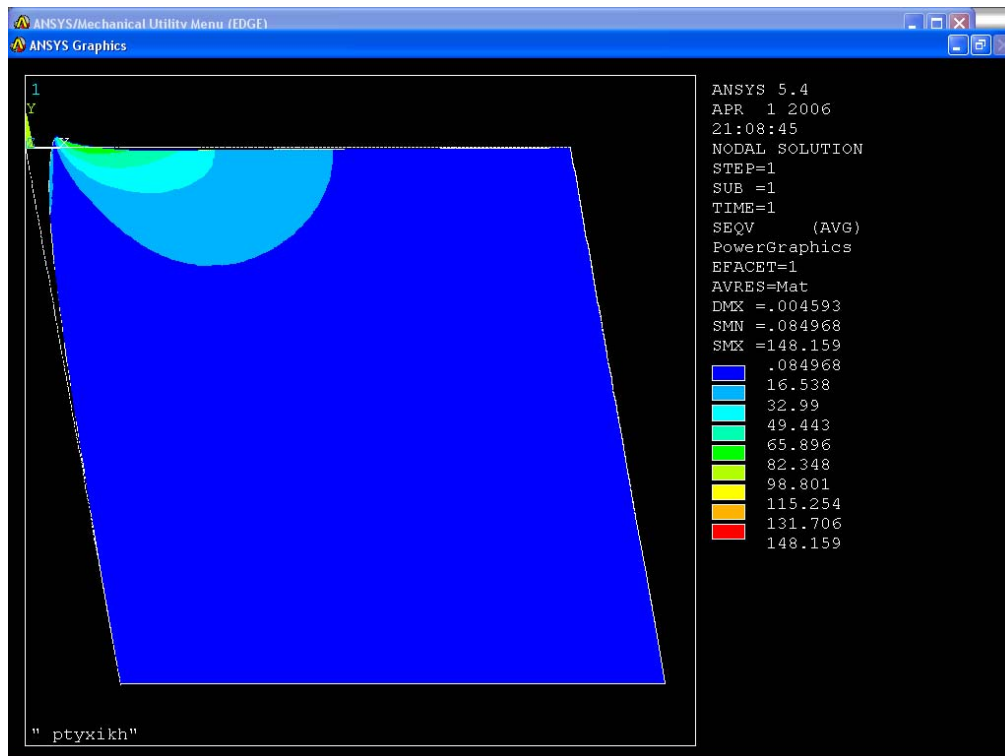
Λεπτομέρεια



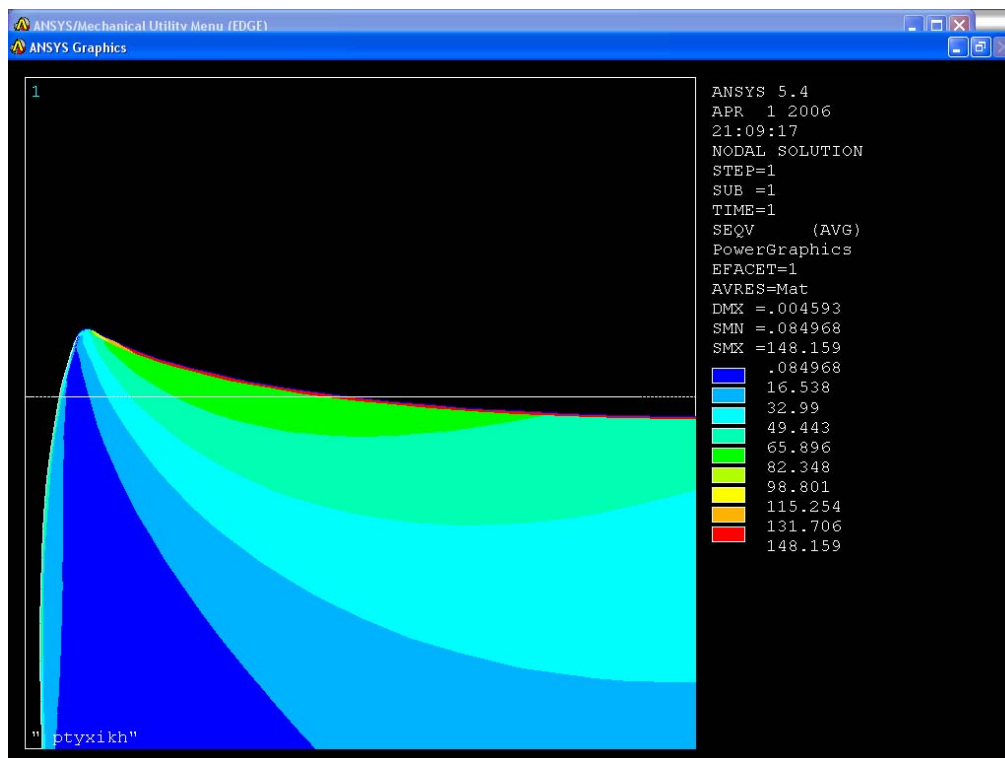
Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,22 mm/rev



Λεπτομέρεια

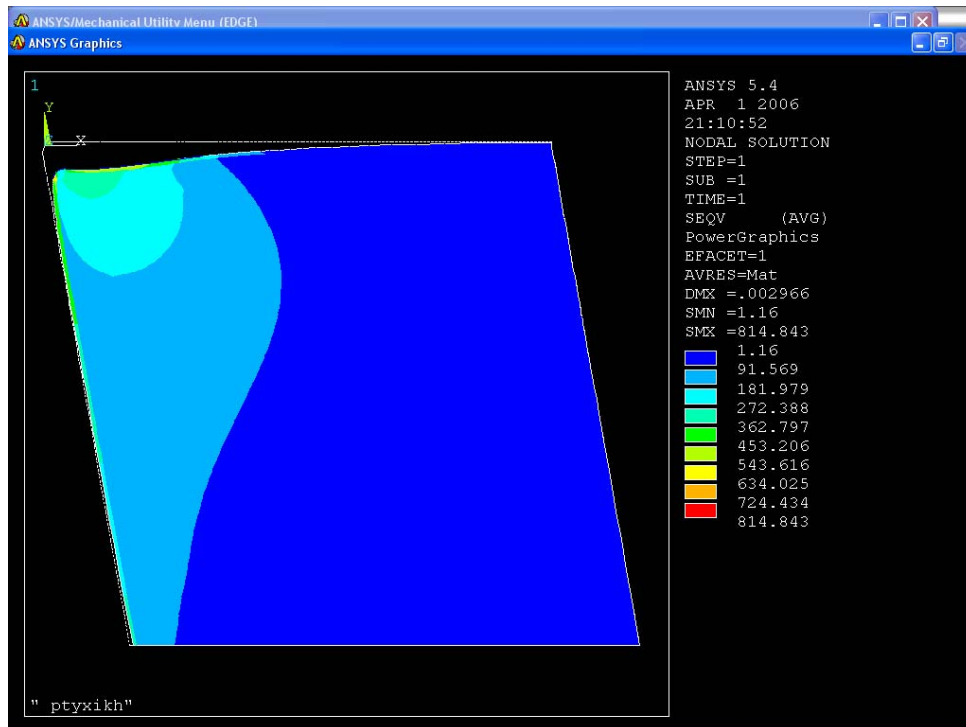


Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,44 mm/rev

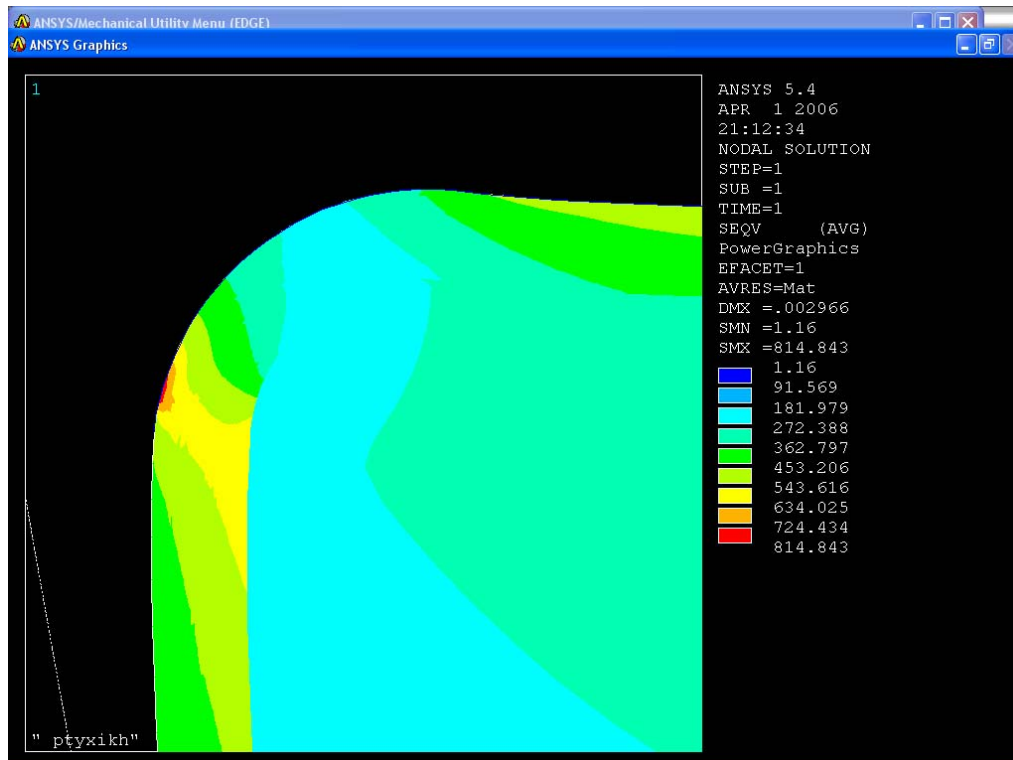


Λεπτομέρεια

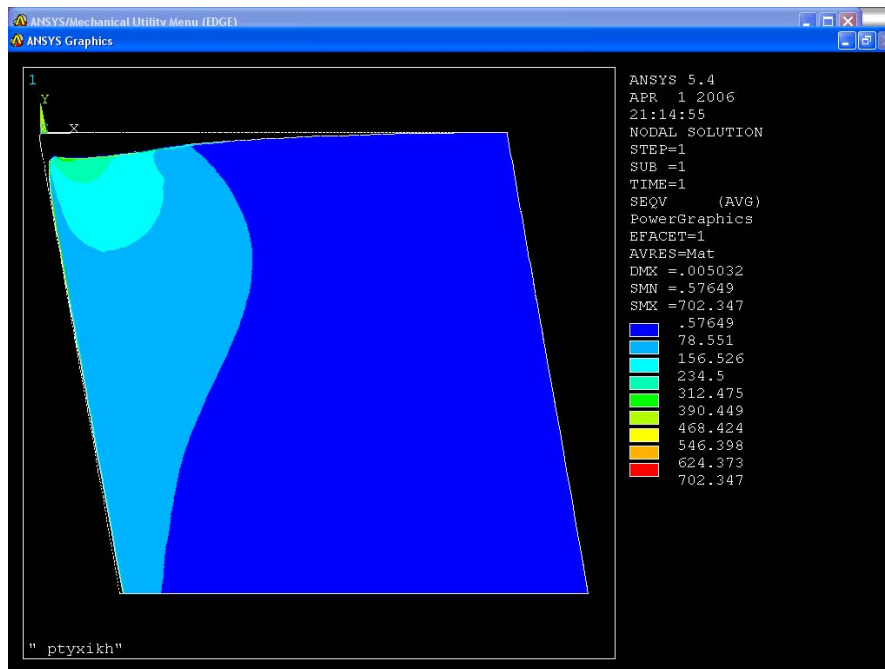
CK 60



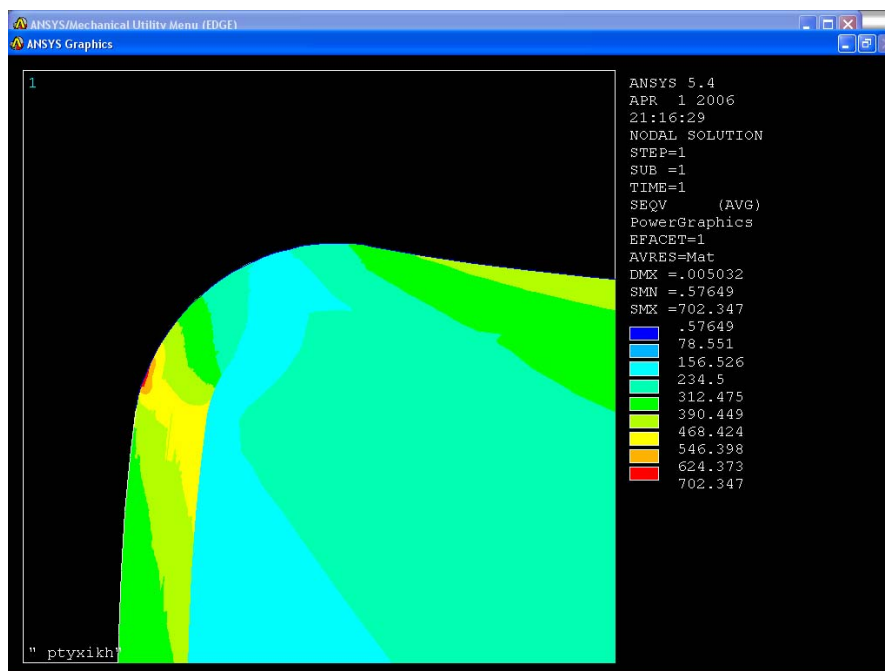
Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,055 mm/rev



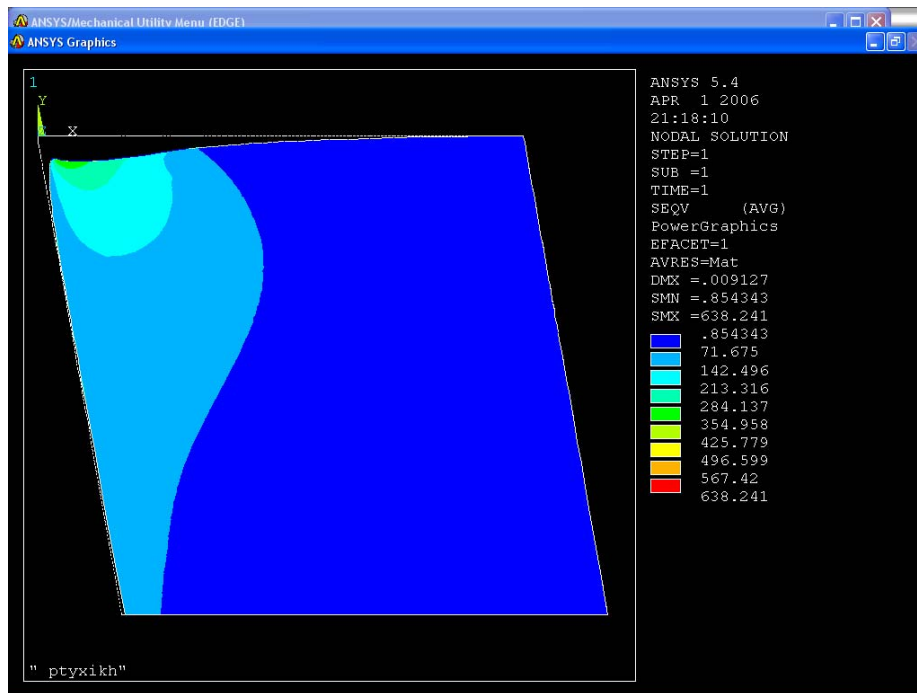
Λεπτομέρεια



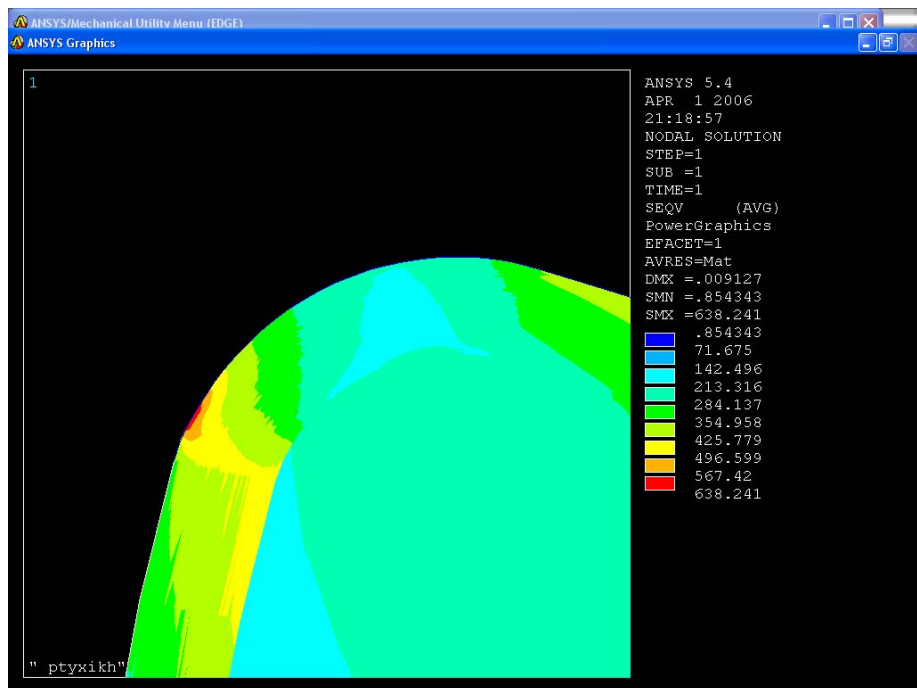
Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,11 mm/rev



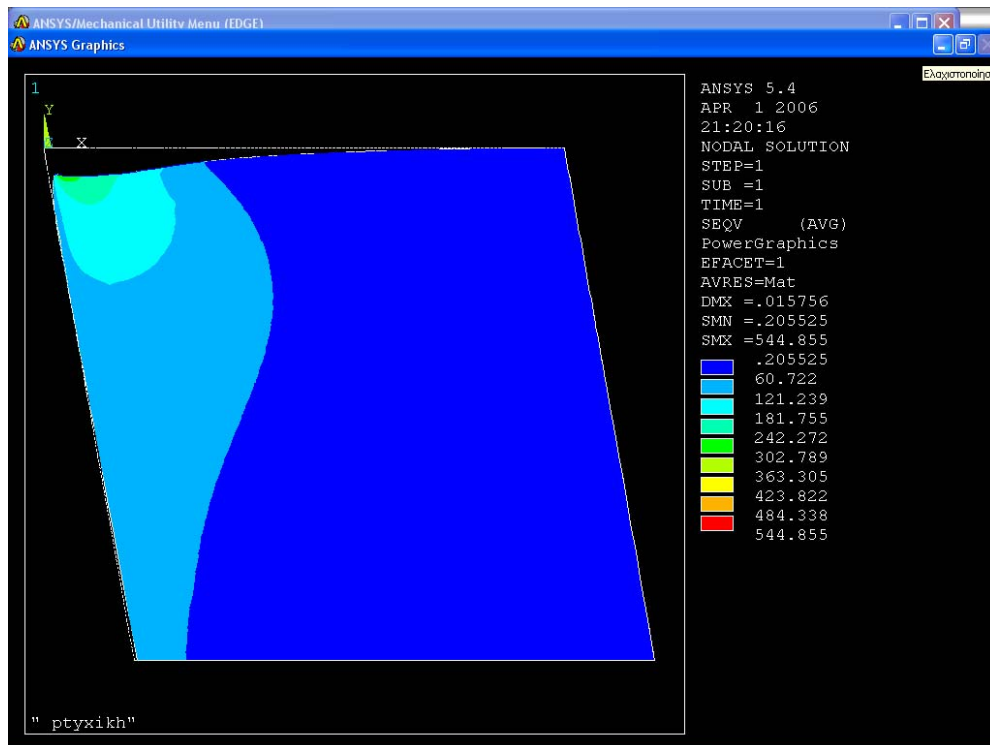
Λεπτομέρεια



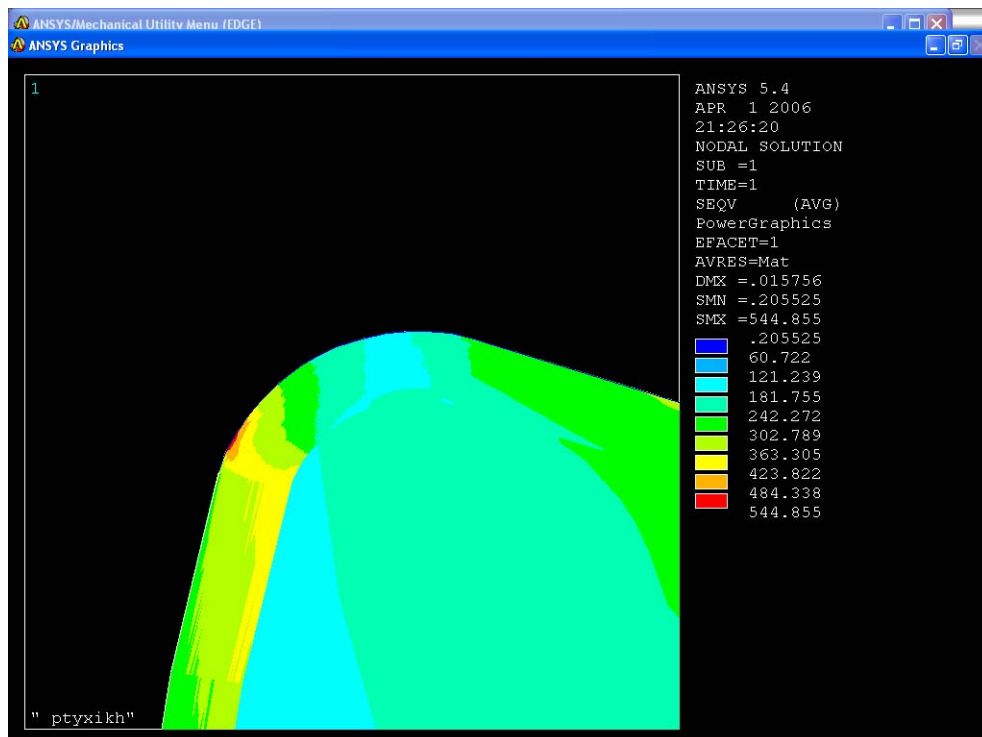
Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,22 mm/rev



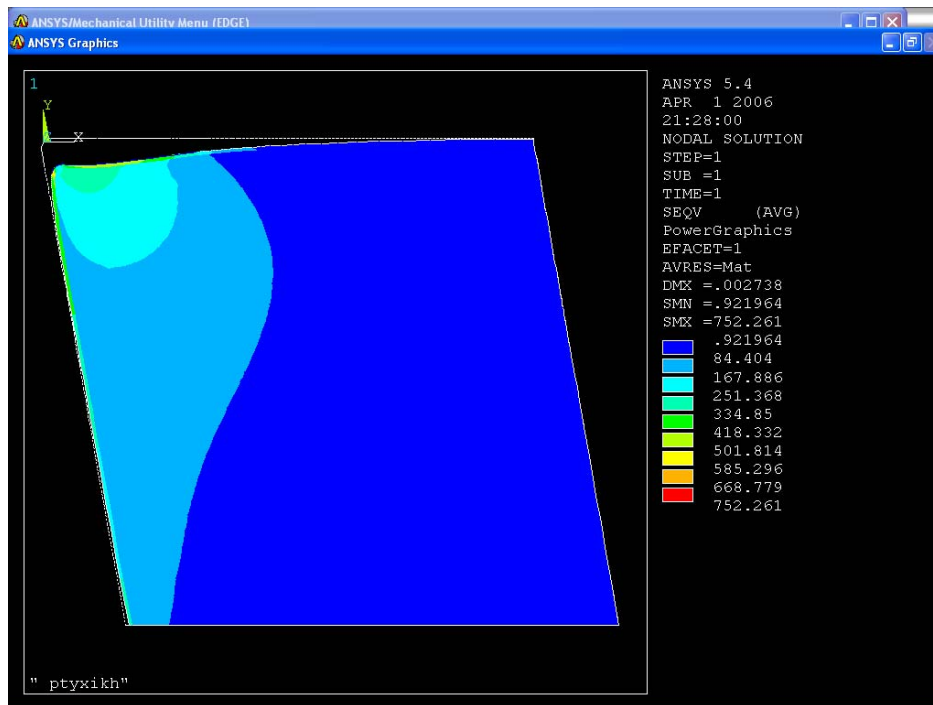
Λεπτομέρεια



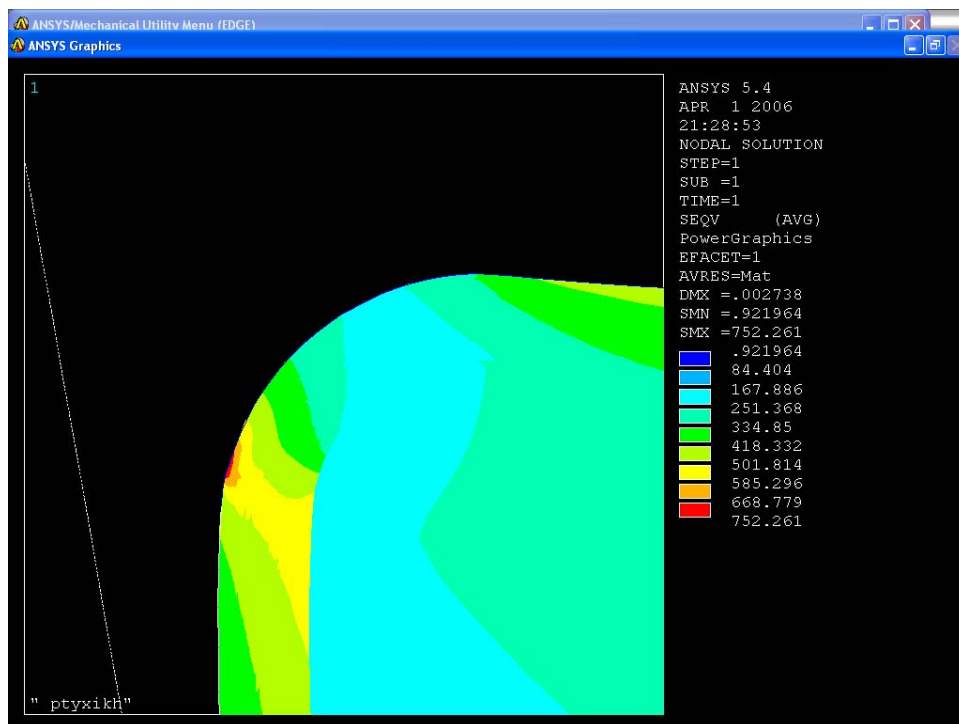
Αξονικό βάθος κοπής 0,35mm . Πρόωση 0,44 mm/rev



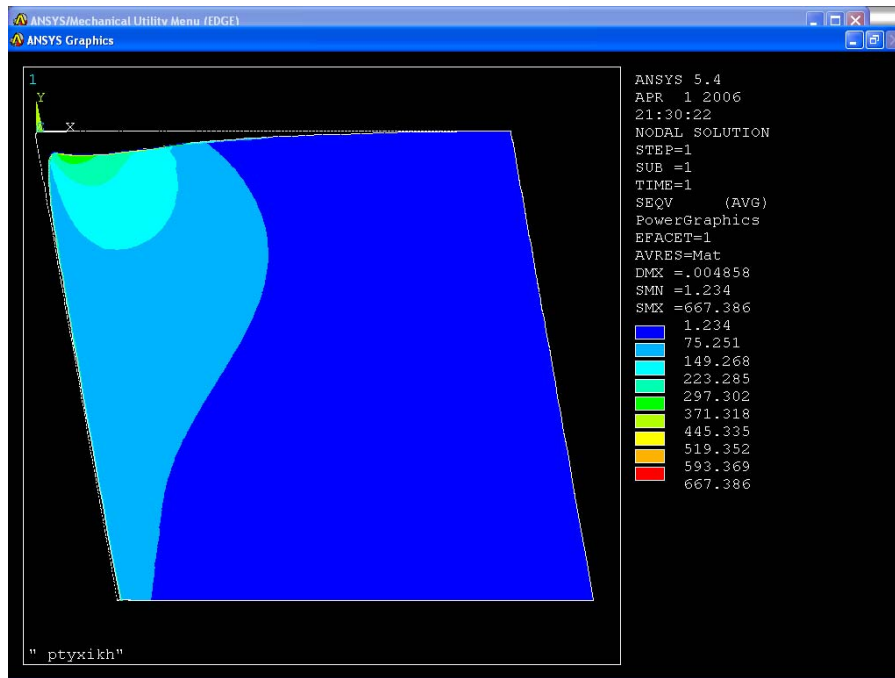
Λεπτομέρεια



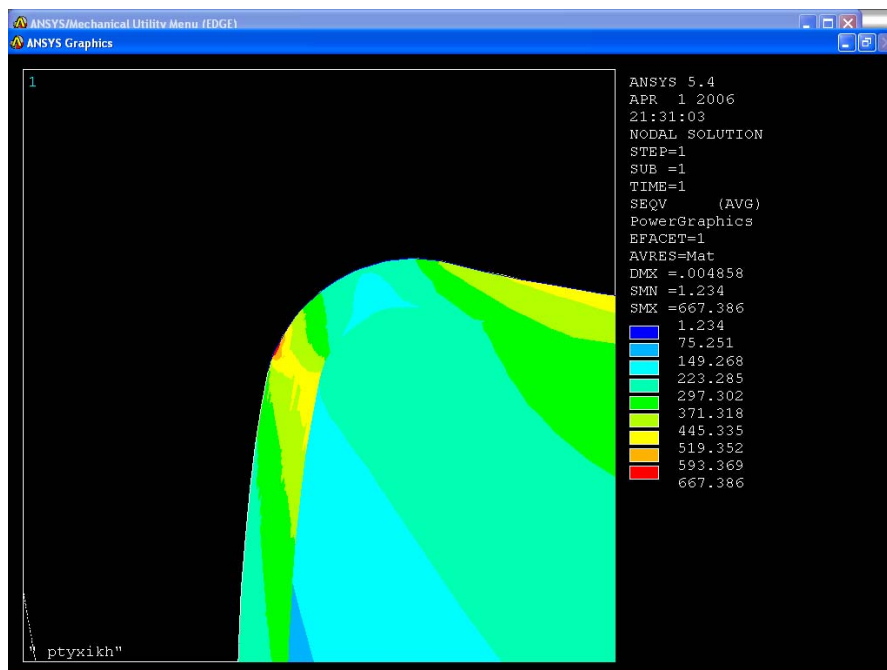
Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,055 mm/rev



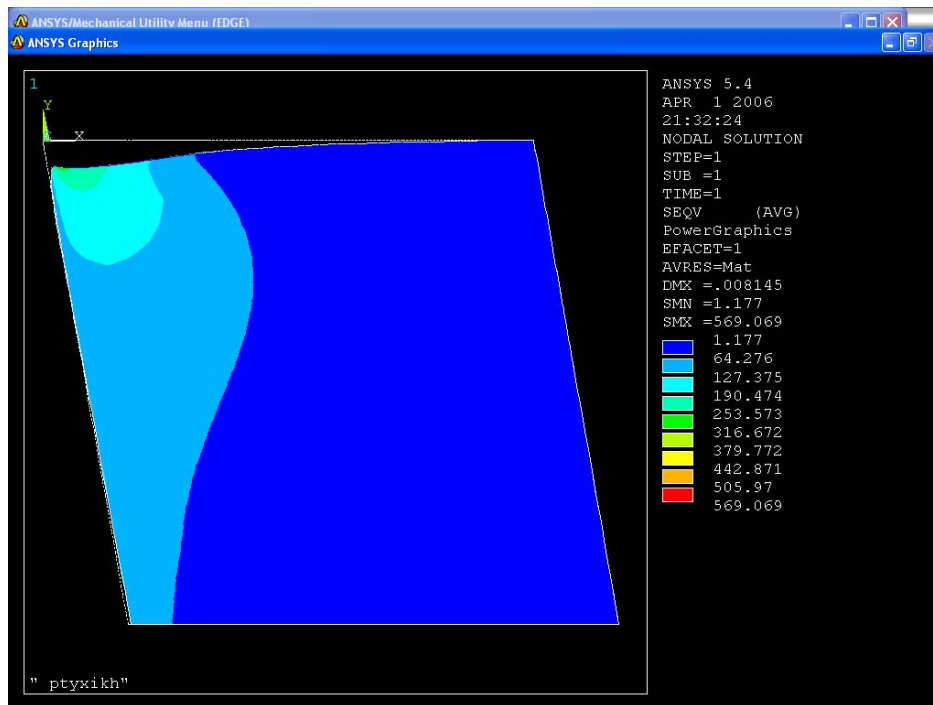
Λεπτομέρεια



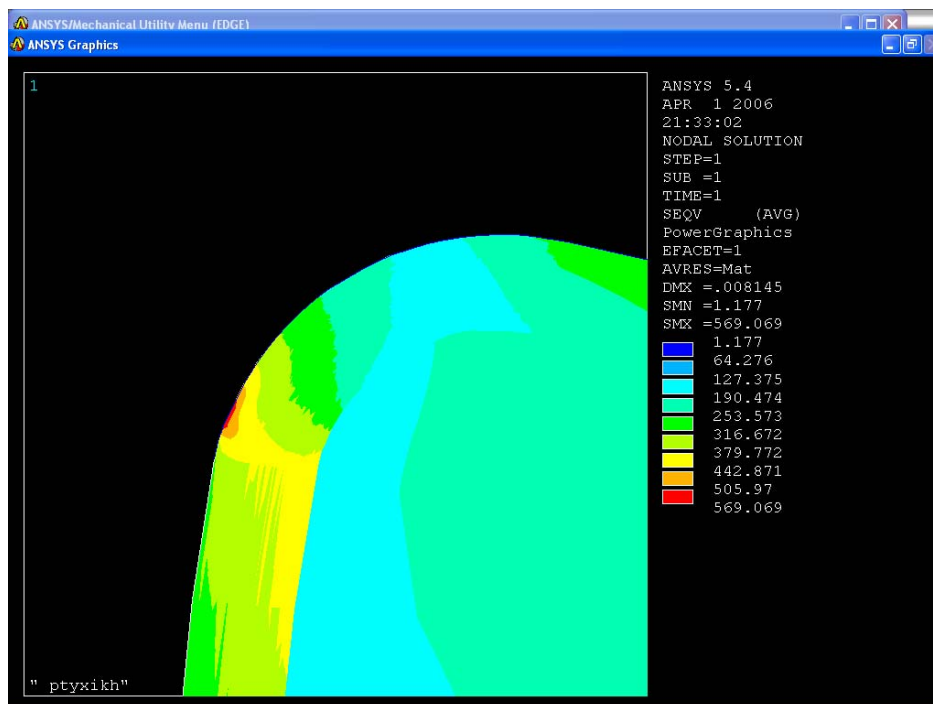
Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,11 mm/rev



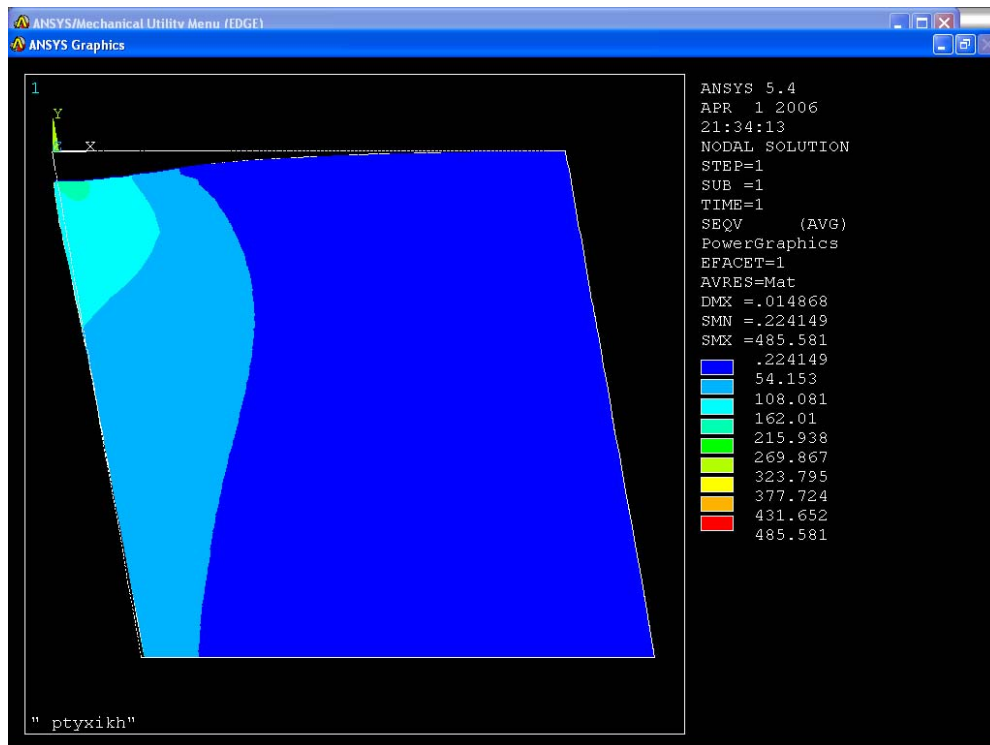
Λεπτομέρεια



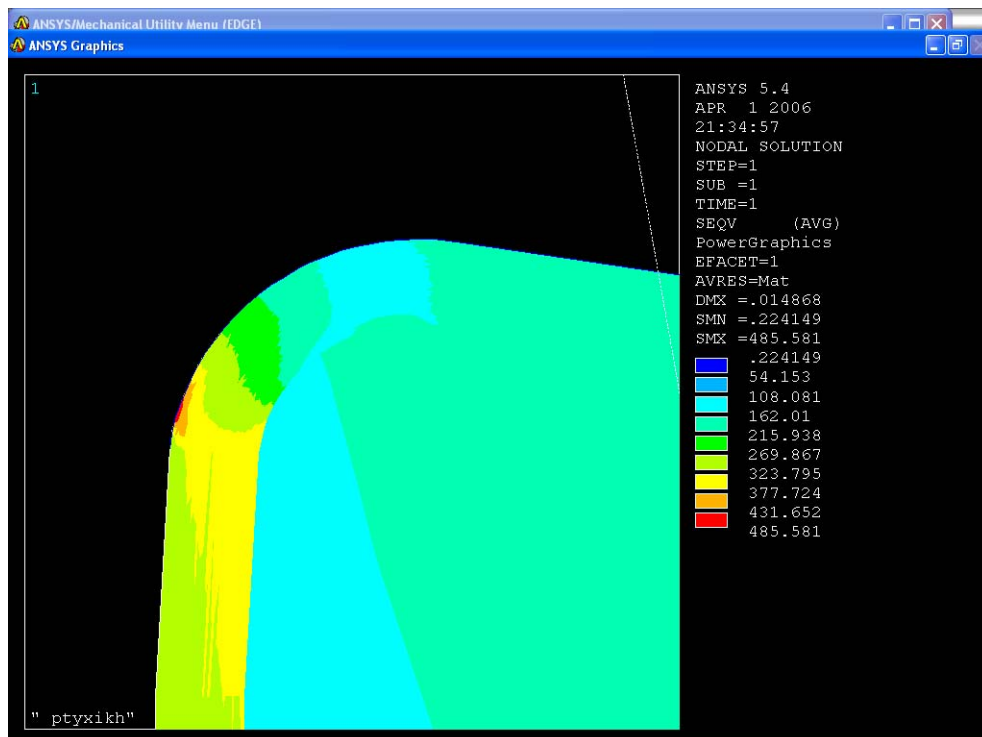
Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,22 mm/rev



Λεπτομέρεια



Αξονικό βάθος κοπής 0,60mm . Πρόωση 0,44 mm/rev



Λεπτομέρεια

Στις παραπάνω φωτογραφίες φαίνεται ποιοτικά αλλά και ποσοτικά η κατανομή των τάσεων στην κοπτική ακμή κατά τη διάρκεια της κοπής. Βλέπουμε λοιπόν ότι η επικάλυψη φορτίζεται περισσότερο από το υπόστρωμα και αυτό γιατί έχει μεγαλύτερη σκληρότητα. Έτσι παρατηρώντας τα διαγράμματα μπορούμε να εξηγήσουμε τον μηχανισμό που οδηγεί στην αστοχία των επικαλύψεων και την αποκόλληση μέρους τους, το οποίο αποκολλάτε από το σημείο που παρατηρείτε το μέγιστο της τάσεως. Μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα σχήματα τόσο την τοπομορφία των τάσεων όσο και την ποιοτική διαφορά των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Οι φωτογραφίες και τα αποτελέσματα μας δείχνουν και την μετατόπιση της κοπτικής αιχμής η οποία αυξάνει όσο αυξάνεται η πρόωση.