

MIKROEMALDA KƏSİCİ TIYƏ RADIUSUNUN DƏYİŞKƏNLIYININ KƏSMƏ REJİMİNƏ TƏSİRİ

Saidə Tağıyeva

Gəncə Dövlət Universiteti, Gəncə, Azərbaycan

e-mail: nauchnayastatya80@gmail.com ;

ORCID: 0009-0002-0151-9632

DOI: <https://doi.org/10.30546/2958-8111.2026.2.124>

Xülasə. Məqalədə kəsici tiyə radiusunun 3,7–5,1 μm diapazonda dəyişməsinin mikroemal zamanı kəsmə rejiminin sərhədlərinə təsiri nəzərdən keçirilir. Tədqiqatın məqsədi radiusun faktiki dəyişmə diapazonunu nəzərə almaqla rejim sərhədlərini analitik qiymətləndirməkdir. İşdə dərc olunmuş eksperimental məlumatlardan istifadə edilmiş, kəsilməmiş qatın qalınlığı h ilə kəsici tiyə radiusu ρ arasındakı h/ρ nisbəti üçün 0,25 və 0,50 keçid meyarları əsasında hesablamalar aparılmışdır. Radiusun minimal və maksimal qiymətləri nəzərə alınmaqla 0,93; 1,28; 1,85 və 2,55 μm sərhədləri hesablanmış və proses beş rejim sahəsinə ayrılmışdır. Bu məqalədə «daha sabit kəsmə rejimi» $h/\rho > 0,50$ şərtinin ödənilməsi rejim kimi qəbul edilir. Orta radius üzrə bu rejimə keçid 2,20 μm , bütün radius diapazonu üzrə isə 2,55 μm alınmış, fərqin 15,9 % olduğu müəyyən edilmişdir. Aparılmış müqayisə göstərir ki, yalnız orta radius qiymətindən istifadə edilməsi sərhəd rejimlərinin qiymətləndirilməsində müəyyən qeyri-dəqiqliyə səbəb ola bilər. Buna görə kəsici tiyə radiusunun dəyişkənliyinin rejim seçimi zamanı ayrıca nəzərə alınması məqsədəuyğundur. Elmi yenilik radiusun yalnız orta qiymətinin deyil, faktiki dəyişmə diapazonunun da rejim sərhədlərinin hesablanmasına daxil edilməsindən ibarətdir. Təklif olunan yanaşma ilkin texnoloji hesablamaların əsaslandırılmasında və sonrakı eksperimental tədqiqatların planlaşdırılmasında istifadə oluna bilər. Yekun istehsal rejiminin seçilməsi isə konkret material–alət sistemi üzrə eksperimental yoxlama tələb edir.

Açar sözlər: mikroemal, kəsici tiyə, tiyə radius, kəsilməmiş qatın qalınlığı, kəsmə rejimi, analitik qiymətləndirmə

Giriş

Çətin emal olunan materialların dəqiq emalında alətin kəsici tiyəsi yalnız makrohəndəsi bucaqlarla xarakterizə edilmir. Tiyənin mikrometr səviyyəsində olan yuvarlaqlaşma radiusu da materialın necə ayrılmasına təsir edir. Kəsilməmiş qatın qalınlığı bu radiusla müqayisə olunan səviyyəyə endikdə materialın bir hissəsi yonqar şəklində ayrılmaq əvəzinə tiyə qarşısında sıxıla və səth boyunca sürüşə bilər. Bu hadisə mikroemalda ölçü effektinin əsas səbəblərindən biri hesab olunur [7, 10].

Müasir tədqiqatlar göstərir ki, kəsici tiyə radiusu kəsmə qüvvələrinə, səthin formalaşmasına, qalıq gərginliklərə və çapaq əmələgəlməsinə təsir edir. Zhuang və həmmüəlliflər kəsici kənar mikrohəndəsəsinə sistemləşdirərək radiusun kəsmə mexanikasında mühüm rolunu göstərmişlər [10]. Hariprasad və həmmüəlliflərin Ti–6Al–4V ərintisi üzrə nəticələri də radiusun dəyişməsinin yonqar morfologiyası və səth bütövlüyünə təsir etdiyini göstərir [1]. Wimmer və həmmüəlliflər isə Ti–6Al–4V frezerlənməsində kəsici tiyə mikrohəndəsəsinin proses qüvvələri ilə əlaqəli olduğunu eksperimental olaraq göstərmişlər [6].

Ədəbiyyatda kəsilməmiş qatın minimal qalınlığının qiymətləndirilməsi üçün müxtəlif yanaşmalar vardır. Wu və həmmüəlliflər müəyyən mikrofrezerləmə şəraitində $h_{\min}=0,17r_n$ nisbətini almışlar [8]. Zheng və həmmüəlliflər Ti–6Al–4V üçün 40 μm kəsici tiyə radiusunda minimal kəsilməmiş qatın 4,833 μm olduğunu müəyyən etmişlər [9]. Wojciechowski-nin kritik icmal müxtəlif material və proseslər üçün vahid $h_{\min}/\rho$ əmsalının olmadığını göstərir [7]. 2025-ci ildə Nowakowski və həmmüəlliflər minimal kəsilən qatın müəyyən edilməsi üçün ayrıca metod təklif etmişlər [3].

Ədəbiyyat təhlili göstərir ki, mövcud tədqiqatlarda h/ρ meyarları və kəsici tiyə radiusunun prosesə təsiri geniş öyrənilsə də, eyni meyarların bir kəsici tiyə üçün ölçülmüş faktiki $\rho_{\min}-\rho_{\max}$ diapazonuna tətbiqi və bu dəyişkənliyin rejim sərhədlərinə təsiri kifayət qədər ayrıca qiymətləndirilməmişdir. Bu tədqiqatda yeni h/ρ meyarı təklif edilmir, əsas yanaşma [5]-də verilmiş $\alpha=0,25$ və $\beta=0,50$ meyarlarının radiusun faktiki dəyişmə

diapazonuna tətbiqidir. Məqsəd həmin diapazon üzrə rejim sərhədlərini hesablamaq və orta radius üzrə qiymətləndirmə ilə bütün diapazon üzrə qiymətləndirmə arasındakı fərqi müəyyən etməkdir.

Məqalədə aparılan analitik qiymətləndirmə radiusun dəyişmə diapazonunun rejim sahələrinə təsirini, bütün nəzərdən keçirilən diapazon üçün daha sabit kəsməyə keçid sərhədini və rejim sərhədlərinin radius dəyişməsinə həssaslığını əhatə edir. Hesablamalar dərc olunmuş ilkin məlumatların müqayisəli və riyazi işlənməsi əsasında aparılmışdır.

Mikroemalda əsas ölçüsüz göstəricilərdən biri kəsilməmiş qatın qalınlığının kəsici tiyə radiusuna nisbətidir. Bu işdə həmin nisbət η ilə işarə olunur:

$$\eta = \frac{h}{\rho}$$

İşarələrin izahı: h — kəsilməmiş qatın qalınlığı, μm ; ρ — kəsici tiyənin yuvarlaqlaşma radiusu, μm ; $\eta=h/\rho$ — ölçüsüz nisbət; α — aşağı rejim sərhəd əmsalı; β — yuxarı rejim sərhəd əmsalı. η azaldıqca tiyənin yuvarlaq hissəsinin materialla nisbi təması artır və sıxılma-sürüşdürülmə təsiri güclənir. η böyüdükcə materialın yonqar şəklində ayrılması üçün şərait yaxşılaşır [7, 8, 10].

Rechenko-nun 2019-cu il məqaləsində çətin emal olunan materialların mikro səviyyədə kəsilməsi ayrıca tədqiq edilmişdir [4]. D.S. Rechenko və həmmüəlliflərin ultrasürətli itiləmə üzrə nəşr edilmiş eksperimental işində 400 m/s itiləmə sürətindən sonra bərk xəlitəli kəsici tiyə üçün orta radius 4,4 μm , minimum 3,7 μm və maksimum 5,1 μm göstərilmişdir [5]. Həmin müəlliflər kəsmə qabiliyyətini h/ρ nisbəti ilə əlaqələndirərək, $h/\rho \leq 0,25$ olduqda sabit kəsmənin formalaşmadığını, 0,25–0,50 intervalında prosesin qeyri-sabit olduğunu, 0,50-dən yuxarı qiymətlərdə isə kəsmənin daha sabit xarakter aldığını göstərmişlər [5].

Hazırkı tədqiqatda bu sərhədlər universal fiziki sabit kimi qəbul edilmir. Onlar yalnız [5]-də təcrübə əsasında verilmiş rejim təsnifatının radiusun dəyişmə diapazonu üzrə təhlili üçün başlanğıc məlumat kimi istifadə olunur. Həmin sərhədlər bir orta radius üçün deyil, bütün nəzərdən keçirilən radius diapazonu üçün hesablanaraq rejim sahələri şəklində qiymətləndirilir.

Materiallar və metodlar

Tədqiqatda mövcud elmi məlumatlar müqayisəli-analitik yanaşma əsasında qiymətləndirilmişdir. Başlanğıc məlumat kimi Rechenko və həmmüəlliflərin nəşr etdirdiyi $\rho_{\min}=3,7 \mu\text{m}$, $\rho_{\text{avg}}=4,4 \mu\text{m}$ və $\rho_{\max}=5,1 \mu\text{m}$ qiymətləri götürülmüşdür [5]. Digər elmi mənbələr kəsilməmiş qatın minimal qalınlığının və kəsici tiyə mikrohəndəsəsinin müasir izahını müqayisə etmək üçün istifadə edilmişdir [1–3, 6–10].

Hesablamalarda kəsici tiyə radiusunun bir qiymət deyil, $\rho_{\min}-\rho_{\max}$ diapazonunda dəyişdiyi qəbul edilmişdir. Orta radius ρ_{avg} ilə işarə olunur. Rechenko və həmmüəlliflərin [5] rejim təsnifatına uyğun olaraq aşağı sərhəd $\alpha=0,25$, yuxarı sərhəd isə $\beta=0,50$ götürülür. Radius dəyişməsinin təsirini qiymətləndirmək üçün dörd sərhəd qiyməti təyin edilir. Bu α və β qiymətləri yalnız [5]-də təsvir olunan eksperimental şərait üçün qəbul edilir və universal fiziki qanun kimi şərh olunmur.

$$h_1 = \alpha \cdot \rho_{\min}; h_2 = \alpha \cdot \rho_{\max}; h_3 = \beta \cdot \rho_{\text{avg}}; h_4 = \beta \cdot \rho_{\max}.$$

h_1-h_4 işarələri hesablanmış sərhəd qalınlıqlarını göstərir. Bu dörd sərhəd kəsmə prosesini beş rejim sahəsi üzrə qiymətləndirməyə imkan verir. Hesablamada yalnız orta radius deyil, nəzərdən keçirilən bütün radius diapazonu nəzərə alınır.

Cədvəl 1.

Hesablamalarda istifadə olunan başlanğıc göstəricilər

Göstərici	Qiymət
$\rho_{\min}$ — minimal tiyə radius	3,7 μm
ρ_{avg} — orta tiyə radius	4,4 μm
$\rho_{\max}$ — maksimal tiyə radius	5,1 μm
α — aşağı rejim sərhədi	0,25
β — yuxarı rejim sərhədi	0,50

Mənbə: Rechenko və həmmüəlliflərin [5] məlumatları əsasında tərtib edilmişdir.

Kəsici tiyə radiusunun dəyişmə diapazonu üzrə rejim sərhədlərinin hesablanması

Qiymətləndirmənin əsas prinsipi ondan ibarətdir ki, eyni h qiymətində $\eta=h/\rho$ nisbəti radiusdan asılı olaraq dəyişir. Radius kiçik olduqda η böyüyür, radius artdıqda isə azalır. Buna görə yalnız orta radius üzrə hesablanan sərhəd nəzərdən keçirilən bütün radius diapazonunda eyni kəsmə rejimini təmin etməyə bilər.

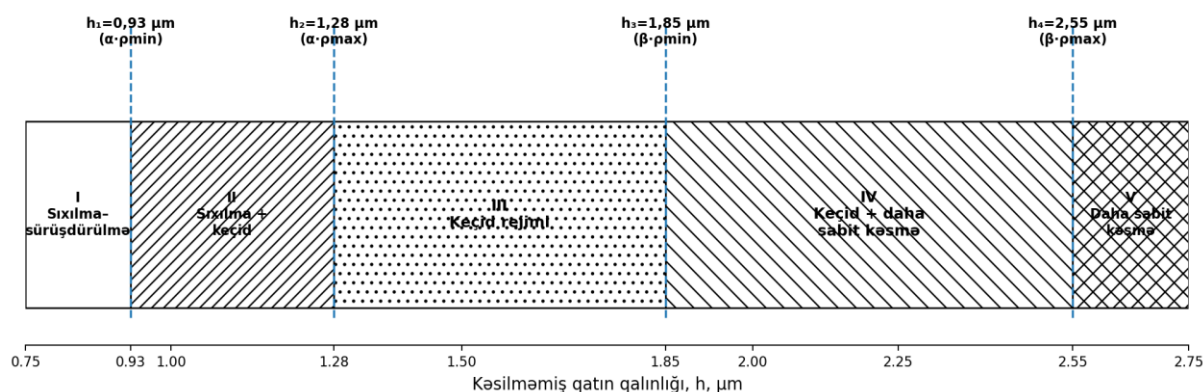
Cədvəl 2

Radius diapazonu üzrə hesablanmış rejim sərhədləri və kəsmə rejimi sahələri

Göstərici / rejim sahəsi	Hesablama ifadəsi və h intervalı, μm	Sərhəd qiyməti və $\eta=h/\rho$ nisbətinin xarakteri	Kəsmə prosesinin xarakteri
h_1	$h_1 = \alpha \cdot \rho_{\min}$	0,93 μm	—
h_2	$h_2 = \alpha \cdot \rho_{\max}$	1,28 μm	—
h_3	$h_3 = \beta \cdot \rho_{\min}$	1,85 μm	—
h_4	$h_4 = \beta \cdot \rho_{\max}$	2,55 μm	—
I	$h \leq 0,93$	bütün radius diapazonunda $\eta \leq 0,25$	sıxılma və sürüşdürülmə üstünlük təşkil edir
II	$0,93 < h \leq 1,28$	η radiusdan asılı olaraq 0,25 sərhədini keçir	sıxılma və keçid rejimi birlikdə müşahidə oluna bilər
III	$1,28 < h \leq 1,85$	bütün radius diapazonunda $0,25 < \eta \leq 0,50$	keçid rejimi üstünlük təşkil edir
IV	$1,85 < h \leq 2,55$	bəzi radius qiymətlərində $\eta > 0,50$	keçid və daha sabit kəsmə rejimləri mümkündür
V	$h > 2,55$	bütün radius diapazonunda $\eta > 0,50$	daha sabit kəsmə rejimi gözlənilir

Mənbə: [5] əsasında müəllif tərəfindən aparılmış hesablamalar

Hesablama nəticəsində $h_1=0,93 \mu\text{m}$, $h_2=1,28 \mu\text{m}$, $h_3=1,85 \mu\text{m}$ və $h_4=2,55 \mu\text{m}$ alınır. Bu sərhədlər əsasında beş rejim sahəsi formalaşır. Şəkil 1-də həmin sahələr birölcülü qərar sxemi kimi göstərilmişdir.



Şəkil 1. Kəsici tiyə radiusunun dəyişmə diapazonuna görə kəsmə rejimi sahələri və sərhəd qiymətləri

Mənbə: [5] məlumatları əsasında müəllif hesablamaları

Bu bölgü keçid sahəsinin mövcudluğu üçün ümumi hesablama şərtini də müəyyən etməyə imkan verir. III sahənin mövcud olması üçün $h_2 < h_3$ olmalıdır. Buradan $\alpha \cdot \rho_{\max} < \beta \cdot \rho_{\min}$ və ya $\rho_{\max} / \rho_{\min} < \beta / \alpha$ alınır. Hazırkı məlumatlar üçün $\rho_{\max} / \rho_{\min} = 5,1 / 3,7 = 1,38$, $\beta / \alpha = 2$ -dir. $1,38 < 2$ olduğuna görə nəzərdən keçirilən radius diapazonunda ayrıca keçid sahəsi formalaşır. Bu münasibət analitik qiymətləndirmənin digər radius diapazonlarına tətbiqi üçün ümumi şərt kimi istifadə oluna bilər.

Radius dəyişməsinin rejim sərhədlərinə təsirini qiymətləndirmək üçün əvvəlcə orta radius üzrə hesablama aparılmışdır. $\rho_{\text{avg}} = 4,4 \mu\text{m}$ olduqda $0,50\rho$ sərhədi üzrə $h = 2,20 \mu\text{m}$ alınır. Bu qiymət orta radius üçün daha sabit kəsməyə keçid sərhədini xarakterizə edir. Lakin eyni $h = 2,20 \mu\text{m}$ qiyməti bütün radius diapazonunda eyni η nisbətini vermir.

$$\eta(\rho = 3,7) = \frac{2,20}{3,7} = 0,595; \eta(\rho = 5,1) = \frac{2,20}{5,1} = 0,431.$$

Beləliklə, $2,20 \mu\text{m}$ qat qalınlığı kiçik radius qiymətlərində $0,50$ sərhədini keçir, böyük radius qiymətlərində isə keçid sahəsində qala bilər. Bu səbəbdən yalnız orta radius üzrə seçilən rejim bütün nəzərdən keçirilən radius diapazonunu eyni şəkildə xarakterizə etmir.

Nəzərdən keçirilən bütün radius diapazonunda $\eta > 0,50$ şərtinin ödənməsi üçün maksimal radius nəzərə alınmalıdır. Bu halda $h > 0,50\rho_{\max}$, yəni $h > 2,55 \mu\text{m}$ tələb olunur. Orta radius üzrə $2,20 \mu\text{m}$ sərhədlə müqayisədə fərq $0,35 \mu\text{m}$ -dir. Nisbi fərq aşağıdakı kimi hesablanır:

$$\frac{2,55 - 2,20}{2,20} \times 100\% = 15,9\%.$$

Alınmış $15,9\%$ fərq göstərir ki, yalnız orta radius qiymətindən istifadə edilməsi nəzərdən keçirilən bütün radius diapazonu üçün daha sabit kəsməyə keçid sərhədinin aşağı qiymətləndirilməsinə səbəb ola bilər. Buna görə rejim sərhədlərinin müəyyən edilməsində radiusun faktiki dəyişmə diapazonunun nəzərə alınması məqsədəuyğundur.

Kəsici tiyə radiusunun dəyişmə diapazonu $\Delta\rho = \rho_{\max} - \rho_{\min} = 5,1 - 3,7 = 1,4 \mu\text{m}$ təşkil edir. Bu dəyişmə aşağı rejim sərhədi üçün $\Delta h_{\alpha} = \alpha \cdot \Delta\rho = 0,35 \mu\text{m}$, yuxarı rejim sərhədi üçün isə $\Delta h_{\beta} = \beta \cdot \Delta\rho = 0,70 \mu\text{m}$ olur.

Deməli, qəbul edilmiş $\alpha = 0,25$ və $\beta = 0,50$ qiymətlərində yuxarı rejim sərhədinin dəyişmə intervalı aşağı sərhədin dəyişmə intervalından iki dəfə böyükdür. Bu nəticə kəsici tiyə radiusunun dəyişməsinin, xüsusilə daha sabit kəsməyə keçid sərhədinin qiymətləndirilməsində nəzərə alınmasının vacibliyini göstərir.

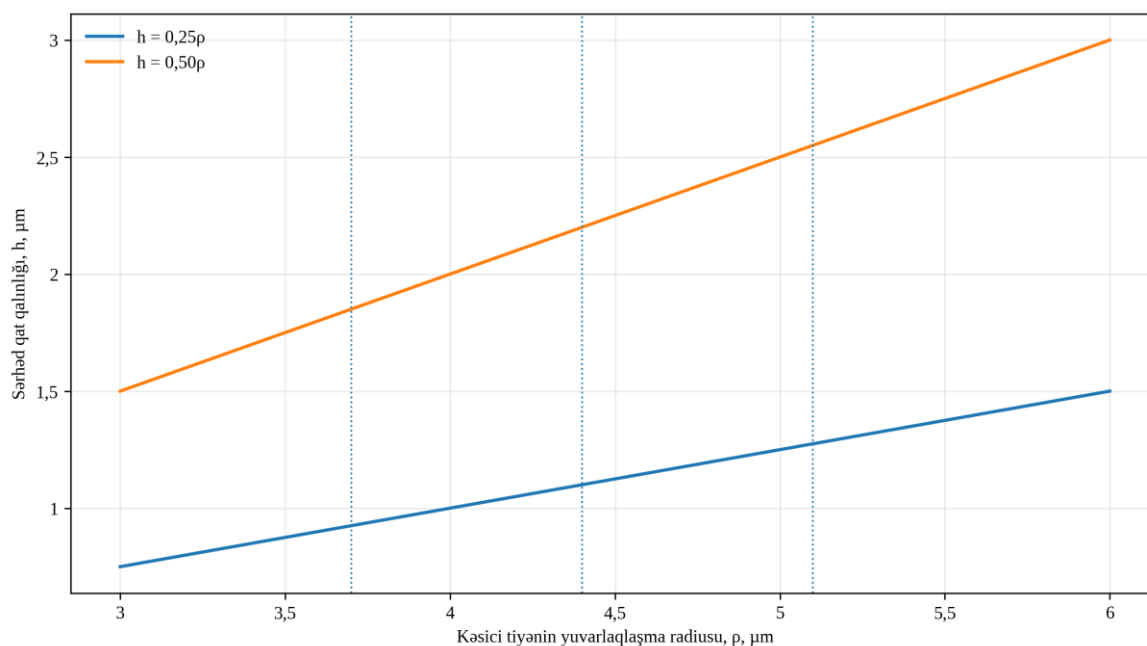
Cədvəl 3.

Orta radius və bütün radius diapazonu üzrə hesablanmış sərhədlərin müqayisəsi

Hesablama variantı	Qəbul edilən radius, μm	Daha sabit kəsməyə keçid sərhədi, μm	Qiymətləndirmə
Orta radius üzrə hesablama	4,4	2,20	orta radius qiymətinə əsaslanan sərhəd
Radius diapazonu nəzərə alınmaqla hesablama	5,1	2,55	bütün nəzərdən keçirilən radius diapazonu üçün sərhəd
Fərq	—	0,35	orta radius üzrə qiymətdən 15,9 % yüksək

Mənbə: Müəllif hesablamaları əsasında tərtib edilmişdir.

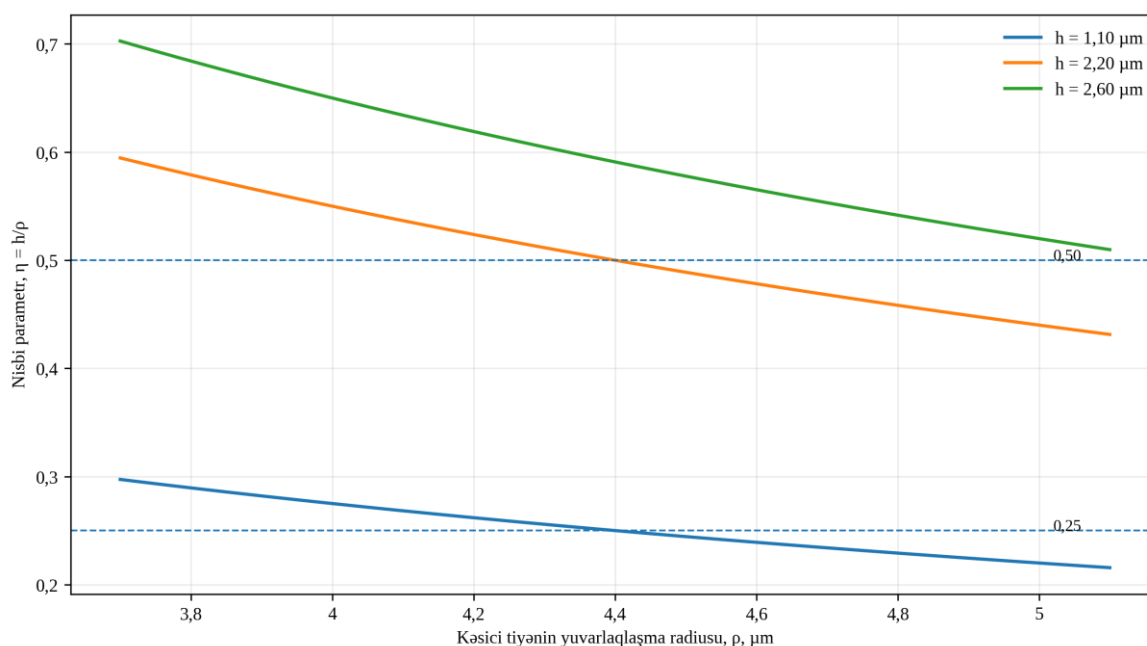
Şəkil 2-də 0,25 ρ və 0,50 ρ sərhədlərinin radiusla xətti dəyişməsi göstərilmişdir. Şaquli xətlər 3,7; 4,4 və 5,1 μm radius qiymətlərini göstərir. Şəkildən görünür ki, radiusun dəyişməsi kəsmə sərhədlərini bir qiymətdən intervala çevirir.



Şəkil 2. Rejim sərhədlərinin kəsici tiyə radiusundan asılılığı

Mənbə: [5] məlumatları əsasında müəllif hesablamaları

Şəkil 3-də üç seçilmiş qat qalınlığı üçün $\eta=h/\rho$ nisbətinin radiusdan asılı dəyişməsi verilmişdir. $h=1,10 \mu\text{m}$ olduqda η böyük radiuslarda 0,25-dən aşağı düşür. $h=2,20 \mu\text{m}$ olduqda əyrinin bir hissəsi 0,50-dən yuxarı, digər hissəsi aşağı qalır. $h=2,60 \mu\text{m}$ olduqda isə bütün 3,7–5,1 μm diapazonunda η 0,50-dən böyükdür.



Şəkil 3. Müxtəlif qat qalınlıqlarında h/p nisbətinin radiusdan asılılığı

Mənbə: [5] məlumatları əsasında müəllif hesablamaları

Nəticələrin müzakirəsi

Alınan nəticələr kəsici tiyə radiusunun dəyişməsinin mikroemal rejiminin seçilməsində ayrıca nəzərə alınmalı olduğunu göstərir. Mövcud elmi tədqiqatların nəticələri kəsici tiyə radiusunun proses mexanikasına təsirini təsdiqləyir [1, 6, 10]. Hazırkı tədqiqatın fərqli cəhəti bu təsirin radiusun dəyişmə diapazonu üzrə rejim sərhədləri şəklində qiymətləndirilməsidir. Orta radius ümumi vəziyyəti xarakterizə etsə də, sərhəd rejimlərində bütün diapazon üçün eyni nəticəni təmin etmir.

Radiusun dəyişmə diapazonu üzrə aparılan analitik qiymətləndirmə kəsilməmiş qatın minimal qalınlığının universal modelini əvəz etmir. Wu və həmmüəlliflərin $h_{\min}=0,17r_n$ nəticəsi [8], Zheng və həmmüəlliflərin Ti-6Al-4V üçün aldığı 4,833 μm nəticəsi [9] və Wojciechowski-nin müxtəlif materiallar üzrə ümumiləşdirməsi [7] göstərir ki, $h_{\min}$ yalnız radiusdan asılı deyil. Materialın xüsusiyyətləri, sürtünmə, effektiv qabaq bucaq, kəsmə sürəti və proses kinematikasına da əhəmiyyətlidir. Buna görə bu məqalədə $\alpha=0,25$ və $\beta=0,50$ sərhədləri yalnız [5]-də verilmiş rejim təsnifatı daxilində istifadə edilmişdir.

Bununla yanaşı, istifadə olunan hesablama sxemi daha ümumi xarakter daşıyır. Başqa material və alət sistemi üçün etibarlı α və β sərhədləri məlum olduqda eyni h_1 – h_4 sxemi həmin sistemə də tətbiq edilə bilər. Bu halda başlanğıc radius diapazonu və təcrübə ilə əsaslandırılmış sərhəd əmsalları uyğunlaşdırılmalıdır.

Kəsici tiyə mikrohəndəsəsinin proses nəticələrinə təsiri son illərin işlərində də təsdiqlənir. Hariprasad və həmmüəlliflər Ti-6Al-4V frezerlənməsində 30–55 μm radiusların yonqar və səth bütövlüyünə təsirini göstərmişlər [1]. Wimmer və həmmüəlliflər radius dəyişməsinə proses qüvvələrindən qiymətləndirməyə çalışmışlar [6]. Karakılınç və həmmüəlliflər Ti64 mikrofrezerlənməsində minimal yonqar qalınlığını 1 μm /diş səviyyəsində müəyyən etmişlər [2]. Bu nəticələr alət mikrohəndəsəsinin ölçülməsinin və rejimlə birlikdə qiymətləndirilməsinin praktik əhəmiyyətini artırır.

Belə qiymətləndirmə kəsici tiyə radiusunun dəyişmə diapazonu məlum olduqda xüsusilə faydalıdır. Təkcə orta qiymətin deyil, minimal və maksimal radiusların da nəzərə alınması rejim sərhədlərinin daha əsaslandırılmış seçilməsinə imkan verir. Bu yanaşma kəsilən qatın mikrometr diapazonunda olduğu yüksək dəqiqlikli emal şəraitində daha böyük əhəmiyyət daşıyır.

Aparılmış hesablamalar Rechenko və həmmüəlliflərin dərc olunmuş 3,7–5,1 μm radius diapazonu və $h/\rho=0,25\text{--}0,50$ rejim sərhədləri əsasında yerinə yetirilmişdir [5]. Buna görə hesablanmış 0,93; 1,28; 1,85 və 2,55 μm sərhəd qiymətləri qəbul edilmiş ilkin məlumatlar və hesablama şərtləri daxilində qiymətləndirilməlidir.

Aparılan analitik qiymətləndirmənin digər materiallara və emal şəraitlərinə tətbiqi zamanı materialın mexaniki xüsusiyyətləri, sürtünmə şəraiti, kəsici alətin qabaq bucağı, kəsmə sürəti və digər texnoloji amillər nəzərə alınmalıdır. Bu amillərin rejim sərhədlərinə təsirinin ayrıca qiymətləndirilməsi sonrakı tədqiqatların istiqamətlərindən biri kimi nəzərdə tutulur.

Elmi yenilik və tətbiqi əhəmiyyət

Tədqiqatın elmi yeniliyi mövcud h/ρ meyarlarının dəyişdirilməsində deyil, [5]-də verilmiş meyarların kəsici tiyə radiusunun faktiki 3,7–5,1 μm dəyişmə diapazonuna tətbiq edilərək rejim sərhədlərinin interval şəklində qiymətləndirilməsindədir. Praktiki əhəmiyyət ondan ibarətdir ki, radiusun minimal və maksimal qiymətləri məlum olduqda bu yanaşma ilkin rejim seçiminin əsaslandırılması və eksperimental sınaqların planlaşdırılması üçün istifadə oluna bilər, konkret istehsal rejimi isə müvafiq alət–material sistemi üzrə eksperimental yoxlama tələb edir.

Nəticə

Aparılmış analitik qiymətləndirmə göstərir ki, kəsici tiyə radiusunun dəyişməsi mikroemal zamanı rejim sərhədlərinə birbaşa təsir edir. Nəzərdən keçirilən 3,7–5,1 μm radius diapazonu üçün hesablanmış sərhəd qiymətləri 0,93; 1,28; 1,85 və 2,55 μm təşkil etmişdir. Bu qiymətlər əsasında kəsmə prosesinin beş xarakterik rejim sahəsi müəyyən edilmişdir.

Orta radius $\rho_{\text{avg}}=4,4$ μm üzrə daha sabit kəsməyə keçid sərhədi 2,20 μm , bütün radius diapazonu nəzərə alındıqda isə 2,55 μm alınmışdır. Fərq 0,35 μm və ya 15,9 % təşkil edir. Bu nəticə göstərir ki, rejim sərhədlərinin yalnız orta radius qiyməti əsasında müəyyən edilməsi bəzi hallarda sərhəd qiymətinin aşağı qiymətləndirilməsinə səbəb ola bilər. Bu 15,9 % fərq yalnız [5]-dən götürülmüş 3,7–5,1 μm radius diapazonu və qəbul edilmiş $\alpha=0,25$, $\beta=0,50$ sərhədləri üçün keçərlidir; digər alət–material sistemlərinə birbaşa şamil edilə bilməz.

Mikroemal rejimlərinin seçilməsində kəsici tiyə radiusunun yalnız orta qiymətinin deyil, onun faktiki dəyişmə diapazonunun da nəzərə alınması məqsədəuyğundur. İstifadə olunan analitik qiymətləndirmə müxtəlif alət–material sistemləri üçün ilkin rejim seçiminin əsaslandırılmasında tətbiq oluna bilər. Digər material və emal şəraitləri üçün sərhəd qiymətləri müvafiq eksperimental məlumatlar əsasında dəqiqləşdirilməlidir.

Ədəbiyyat

1. Hariprasad, B., Selvakumar, S. J., & Samuel Raj, D. (2022). Effect of cutting edge radius on end milling Ti–6Al–4V under minimum quantity cooling lubrication—Chip morphology and surface integrity study. *Wear*, 498–499, 204307. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204307>
2. Karakılınç, U., Ergene, B., Yalçın, B., Aslantaş, K., & Erçetin, A. (2023). Comparative analysis of minimum chip thickness, surface quality and burr formation in micro-milling of wrought and selective laser melted Ti64. *Micromachines*, 14(6), 1160. <https://doi.org/10.3390/mi14061160>
3. Nowakowski, L., Bronis, M., Blasiak, S., & Skrzyniarz, M. (2025). A method for determining the minimum thickness of the cut layer in precision milling. *Materials*, 18(1), 189. <https://doi.org/10.3390/ma18010189>
4. Rechenko, D. S. (2019). Исследование процесса резания труднообрабатываемых материалов на микроуровне. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 21(2), 18–25. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.2-18-25>
5. Rechenko, D. S., Popov, A. Y., Titov, Y. V., Balova, D. G., & Gritsenko, B. P. (2019).

- Ultra-high-speed sharpening and hardening the coating of carbide metal-cutting tools for finishing aircraft parts made of titanium alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, 1260(6), 062020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/6/062020>
6. Wimmer, M., Hartl, R., & Zaeh, M. F. (2023). Determination of the cutting-edge microgeometry based on process forces during peripheral milling of Ti-6Al-4V using machine learning. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(3), 100. <https://doi.org/10.3390/jmmp7030100>
 7. Wojciechowski, S. (2022). Estimation of minimum uncut chip thickness during precision and micro-machining processes of various materials—A critical review. *Materials*, 15(1), 59. <https://doi.org/10.3390/ma15010059>
 8. Wu, X., Liu, L., Du, M., Shen, J., Jiang, F., Li, Y., & Lin, Y. (2020). Experimental study on the minimum undeformed chip thickness based on effective rake angle in micro milling. *Micromachines*, 11(10), 924. <https://doi.org/10.3390/mi11100924>
 9. Zheng, Y., Huang, W., Liu, Y., Duan, P., & Wang, Y. (2024). Determination of the minimum uncut chip thickness of Ti-6Al-4V titanium alloy based on dead metal zone. *Micromachines*, 15(12), 1458. <https://doi.org/10.3390/mi15121458>
 10. Zhuang, K., Fu, C., Weng, J., & Hu, C. (2021). Cutting edge microgeometries in metal cutting: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 2045–2092. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07558-6>

EFFECT OF CUTTING-EDGE RADIUS VARIATION ON THE CUTTING REGIME IN MICROMACHINING

Saida Taghiyeva

Ganja State University, Ganja, Azerbaijan

The article examines the effect of variation in the cutting-edge radius within the range of 3.7–5.1 μm on cutting-regime boundaries in micromachining. The aim of the study is to analytically evaluate the regime boundaries by taking into account the actual range of cutting-edge radius variation. Published experimental data were used, and calculations were performed using the 0.25 and 0.50 transition criteria for the ratio of uncut chip thickness h to cutting-edge radius ρ (h/ρ). Considering the minimum and maximum radius values, boundaries of 0.93, 1.28, 1.85, and 2.55 μm were calculated, and the process was divided into five regime zones. The transition to more stable cutting was obtained at 2.20 μm when using the average radius and at 2.55 μm when considering the entire radius range, giving a difference of 15.9%. The comparison shows that using only the average radius may lead to an underestimation of the boundary value. Therefore, cutting-edge radius variation should be considered separately when selecting the cutting regime. The scientific novelty lies in incorporating not only the average radius but also its actual variation range into the calculation of regime boundaries. The proposed approach can be used to support preliminary technological calculations and to plan subsequent experimental studies. The final selection of production conditions requires experimental verification for a specific material–tool system.

Keywords: micromachining, cutting edge, edge radius, uncut chip thickness, cutting regime, analytical evaluation

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАДИУСА РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ НА РЕЖИМ РЕЗАНИЯ ПРИ МИКРООБРАБОТКЕ

Саида Тагиева

Гянджинский государственный университет, Гянджа, Азербайджан

В статье рассматривается влияние изменения радиуса режущей кромки в диапазоне 3,7–5,1 мкм на границы режима резания при микрообработке. Цель исследования состоит в аналитической оценке границ режима с учетом фактического диапазона изменения радиуса режущей кромки. В работе использованы опубликованные экспериментальные данные, а расчеты выполнены по переходным критериям 0,25 и 0,50 для отношения толщины несрезанного слоя h к радиусу режущей кромки ρ (h/ρ). С учетом минимального и максимального значений радиуса рассчитаны границы 0,93; 1,28; 1,85 и 2,55 мкм, а процесс разделен на пять режимных областей. При использовании среднего радиуса граница перехода к более

устойчивому резанию составила 2,20 мкм, а с учетом всего диапазона радиуса — 2,55 мкм; разница составляет 15,9 %. Проведенное сравнение показывает, что использование только среднего значения радиуса может привести к занижению граничного значения. Поэтому при выборе режима резания целесообразно отдельно учитывать изменчивость радиуса режущей кромки. Научная новизна заключается во включении в расчет границ режима не только среднего значения радиуса, но и фактического диапазона его изменения. Предложенный подход может использоваться для обоснования предварительных технологических расчетов и планирования последующих экспериментальных исследований. Окончательный выбор производственного режима требует экспериментальной проверки для конкретной системы «материал–инструмент».

Ключевые слова: микрообработка, режущая кромка, радиус кромки, толщина несрезанного слоя, режим резания; аналитическая оценка

Daxil oldu:
01.06.2026

Çap edildi:
19.10.2026