L'USINAGE DES MATÉRIAUX DURS ET FRAGILES

Rectification assistée par ultrasons avec la PRIMINER C500ultrasonic



SYNTHÈSE

Rectification assistée par ultrasons du verre de quartz et de l'alumine

Le verre de quartz et les céramiques techniques comme l'oxyde d'aluminium (alumine) sont des matériaux essentiels dans de nombreux secteurs de haute technologie. Dans l'industrie des semi-conducteurs, le verre de quartz sert p. ex. aux porte-wafers et aux masques de gravure, car il est stable thermiquement et chimiquement. En optique, on en fait des lentilles de précision, des prismes et des guides de lumière. Il joue aussi un rôle clé en technique médicale moderne, notamment dans les appareils de diagnostic et les systèmes laser.

L'oxyde d'aluminium est lui aussi largement utilisé dans l'industrie. En technique médicale, il sert par exemple à des implants biocompatibles tels que les têtes de prothèses de hanche, qui profitent de sa haute résistance à l'usure et à la corrosion. On le retrouve aussi dans l'aéronautique et le spatial, comme protection thermique de composants critiques ou comme matériau de paliers et de joints devant résister à des sollicitations mécaniques et thermiques extrêmes.

Les propriétés qui rendent le verre de quartz et l'oxyde d'aluminium si précieux compliquent aussi leur usinage. Très durs et fragiles, ces deux matériaux sont sujets aux microfissures, à une forte usure des outils et à des états de surface insuffisants. La rectification s'impose donc comme procédé. Elle exige une grande précision, en particulier pour les géométries complexes, afin de répondre aux exigences des applications précitées.

L'assistance par ultrasons offre un fort potentiel pour relever ces défis en rectification. L'apport de vibrations à haute fréquence réduit les efforts de procédé, améliore l'état de surface et minimise l'usure des outils. Ce livre blanc présente les effets et les avantages de la rectification assistée par ultrasons pour le verre de quartz et l'oxyde d'aluminium. Le système à ultrasons VibroCut *ultrasonic* y est utilisé pour appliquer des vibrations à haute fréquence à l'outil de rectification. Ce système innovant se distingue notamment par sa puissance élevée, qui permet de grandes amplitudes de vibration, et par la précision de son comportement en cours de procédé.

Synthèse	02
Rectification assistée par ultrasons des matériaux durs et fragiles	03
Effets technologiques et mécanismes d'action	04
Résultats	05
Bénéfices client	06
Informations complémentaires VibroCut	07
La machine C500-5X ultrasonic PRIMINER	08
Partenaire d'exécution UNITECH-Maschinen GmbH	09

ÉTUDE DE L'APPLICATION DE L'ASSISTANCE PAR ULTRASONS AVEC VibroCut *ultrasonic*

À titre d'exemple pour les matériaux durs et fragiles, la rectification assistée par ultrasons est étudiée sur des pièces en verre de quartz et en oxyde d'aluminium.

Pour réaliser l'assistance par ultrasons, UNITECH-Maschinen GmbH a équipé le centre d'usinage PRIMINER C500 du système VibroCut *ultrasonic*. Une vibration ultrasonore est générée dans le porte-outil en rotation et superposée de façon ciblée à la cinématique de l'usinage. L'amplitude de vibration est définie par des fonctions M dans le programme CN et se règle sur une large plage. La fréquence de vibration est trouvée et asservie automatiquement par le système. Sa particularité : une puissance et une précision élevées, fondées sur un capteur interne assurant une régulation très dynamique des ultrasons.
Les paramètres d'essai ont été adaptés aux matériaux usinés ; ils sont résumés dans le tableau 1.

Pour évaluer les effets de l'assistance par ultrasons, les forces passives du procédé de rectification ont été mesurées avec une plateforme dynamométrique (Kistler), puis comparées entre rectification conventionnelle et assistée par ultrasons.

Pour protéger les éléments de haute précision de la machine, UNITECH a modifié les organes d'entraînement : soigneusement capotés, ils résistent aux poussières de rectification agressives.

	Verre de quartz	**Oxyde d'aluminium**
Outil	Meule sur tige – grain diamant liant électrolytique	Meule sur tige – grain diamant liant électrolytique
Diamètre de l'outil	Ø10 mm	Ø10 mm
Vitesse de coupe v_c	2,5 m/s	2,5 m/s
Profondeur de passe a_p	0,2 mm	0,06 mm
Largeur de passe a_e	1 mm	2 mm
Vitesse d'avance v_f	120…200 mm/min	300…500 mm/min
Pression liquide de coupe	Émulsion 30 bar	Émulsion 30 bar
Fréquence de vibration	≈ 18,5 kHz	≈ 18,5 kHz
Amplitude de vibration	4 µm / 8 µm / 12 µm	4 µm / 8 µm / 12 µm

Tableau 1 : paramètres des essais de rectification

Effets technologiques et mécanismes d'action

Pour étudier la rectification assistée par ultrasons du **verre de quartz**, la pièce a été surfacée sur sa face frontale. La figure 2 montre, pour le verre de quartz, l'évolution des forces d'avance aux différentes avances, en procédé conventionnel et assisté par ultrasons, pour une amplitude de vibration croissant de 4 µm à 12 µm. Les forces augmentent avec l'avance et atteignent au maximum 4,5 N en rectification conventionnelle. Pour ces matériaux sensibles, durs et fragiles, les efforts de coupe sont un critère d'évaluation important, car ils déterminent l'efficacité de l'enlèvement de matière. Des forces trop élevées limitent la productivité et l'état de surface et peuvent causer des défauts tels que microfissures ou éclats. La figure 2 montre que l'assistance par ultrasons réduit nettement la force passive aux deux avances. Les forces baissent quand l'amplitude de vibration augmente. À une vitesse d'avance de 0,2 m/min et une amplitude de 12 µm, l'assistance par ultrasons abaisse la force passive de 4,5 N à 2 N, soit une baisse drastique de 56 %. Cet effet s'explique par le « micro-martelage » des ultrasons, qui fracture le matériau fragile à l'échelle microscopique et permet ainsi un enlèvement de matière contrôlé. De plus, le mouvement rapide de l'outil modifie la cinématique et soumet les grains abrasifs à une sollicitation multiaxiale.

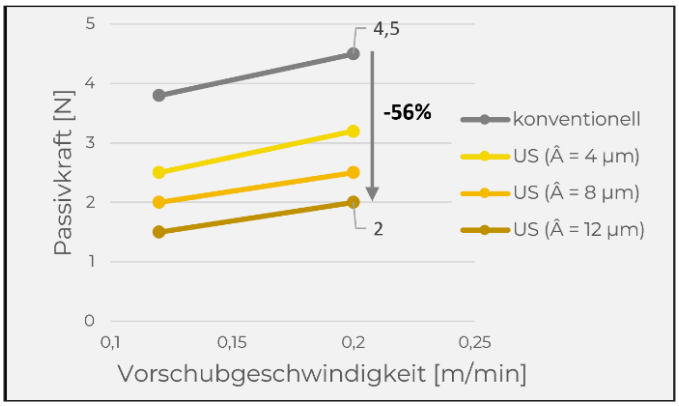


Figure 2 : diagramme des forces passives, verre de quartz

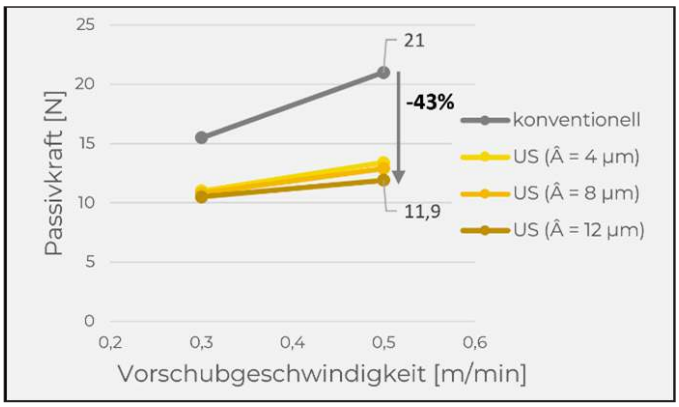


Figure 3 : diagramme des forces passives, oxyde d'aluminium

Pour le second matériau, l'**oxyde d'aluminium**, les forces ont été mesurées selon une démarche comparable. La figure 3 montre les forces passives lors de la rectification de la céramique. Ici aussi, les forces augmentent avec l'avance. En rectification convention- nelle, à une vitesse d'avance de 0,5 m/min, la force passive atteint 21 N pour l'oxyde d'aluminium. Pour ce matériau aussi, les efforts de coupe déterminent l'efficacité de la rectification. L'assistance par ultrasons du procédé réduit là encore drastiquement les efforts d'usinage. À une avance de 0,5 m/min et une amplitude de vibration de 12 µm, la force passive baisse de 43 % pour atteindre 11,9 N. Contrairement au verre de quartz, l'amplitude de vibration a ici moins d'influence : les effets des amplitudes comprises entre 4 µm et 12 µm sont quasi identiques. En raison du comportement fragile du matériau, les ultrasons rendent ici aussi l'enlèvement de matière plus efficace et mieux contrôlé, ce qui améliore les performances de la rectification.

Résultats

Les résultats montrent que l'assistance par ultrasons améliore les propriétés et les performances de la rectification. Les porte-outils à ultrasons impriment à l'outil une vibration à haute fréquence, qui modifie à la fois la cinématique du procédé et les mécanismes de formation du copeau. Les effets peuvent se résumer ainsi :

1. Mouvement ultrarapide du grain abrasif

Les ultrasons impriment à la meule des mouvements extrêmement rapides : chaque grain oscille en direction axiale en plus de sa rotation. Les conditions d'engagement des grains abrasifs en sont fortement modifiées.

2. Enlèvement de matière efficace

Les ultrasons provoquent un « micro-martelage » des grains abrasifs, qui fracture de façon définie le matériau dur et fragile en surface. L'enlèvement de matière devient plus efficace et mieux contrôlé.

3. Autonettoyage

Les ultrasons réduisent les dépôts sur l'outil de rectification et empêchent son encrassement. L'outil conserve ainsi plus longtemps son tranchant et son mordant.

4. Affûtage des grains

La sollicitation multiaxiale et par chocs fracture les grains abrasifs, ce qui crée de nouvelles arêtes vives.



Bénéfices client

Les efforts d'usinage drastiquement réduits repoussent les limites actuelles de la rectification en productivité, fiabilité du procédé et qualité des pièces. La figure 4 résume les avantages de l'assistance par ultrasons pour la rectification de matériaux durs et fragiles comme le verre de quartz ou de céramiques comme l'oxyde d'aluminium.



Figure 4 : avantages de la rectification assistée par ultrasons

L'enlèvement de matière efficace et contrôlé améliore la qualité des pièces en termes de rugosité de surface et évite microfissures et éclats. Outre l'allongement de la durée de vie des outils, c'est surtout le potentiel d'augmentation des conditions de coupe, et donc de la productivité de la rectification, qui permet de réaliser des économies avec VibroCut ultrasonic.

Économies avec VibroCut *ultrasonic* en rectification de matériaux durs et fragiles

Exemple de calcul : hausse des paramètres de coupe

- Taux horaire machine : 75,- € / h
- Temps d'occupation prévu : 4000 h / an (500 postes par an)
- Part rectification/cycle : 80%

Hausse des param. de coupe	Gain de productivité	Économie par machine/an
20%	13,3%	39 900 €
50%	26,7%	80 100 €
100%	40%	120 000 €

Figure 5 : exemple de calcul du bénéfice économique lié à la hausse des conditions de coupe

La figure 5 présente un exemple de calcul de rentabilité. Dans de nombreux cas d'application, le retour sur investissement est inférieur à un an.

Un autre avantage majeur de l'assistance par ultrasons est la hausse de la fiabilité du procédé. L'usinage efficace et ménageant qu'apportent les ultrasons aide, surtout pour les pièces complexes et coûteuses, à réduire le risque d'incidents de procédé et d'écarts affectant la qualité, et donc à éviter des rebuts coûteux en temps et en argent. C'est particulièrement vrai pour l'usinage sans opérateur sur plusieurs postes.

Informations complémentaires

VibroCut *ultrasonic* est un système breveté de VibroCut GmbH. Nous sommes fournisseur de produits et de technologie pour l'usinage assisté par ultrasons dans votre production. Nous commercialisons les systèmes à ultrasons destinés à équiper des machines neuves ou existantes et vous proposons les prestations de service associées.

Le système VibroCut ultrasonic incarne les ultrasons les plus puissants et les plus précis du marché. Sa puissance considérable permet d'atteindre de grandes amplitudes de vibration et de faire vibrer même de gros outils de rectification. Un capteur intégré mesure directement la vibration ultrasonore. Une régulation très dynamique garantit ainsi des caractéristiques de vibration reproductibles et porte la précision des ultrasons à un niveau inédit.

Le système existe en différentes classes de puissance, dimensions et interfaces, adaptées à votre machine-outil. Selon les exigences du procédé, l'utilisateur a le choix entre quatre classes de puissance – de la Precision-Line pour les outils délicats, avec des vitesses jusqu'à 30 000 tr/min, à la Performance-Line pour les applications avec de gros outils massifs. Les Precision-Line (100 W), Standard-Line (250 W) et Performance-Line (500 W) sont prévues pour les centres d'usinage à changement d'outil automatique.



Performances VibroCut *ultrasonic*			
Fréq. de vibration	f_{Vib}	=	16 ... 50 kHz
Amplitude	Â	=	0,1 ... 80 µm
Puissance	P_{Wmax}	=	100 ... 1 000 W

Figure 6 : porte-outils à ultrasons pour VibroCut ultrasonic

N'hésitez pas à nous contacter directement ou à consulter notre site web :

VIBROCUT

VibroCut GmbH
Annaberger Str. 240
09125 Chemnitz
info@vibrocut.de
www.vibrocut.de

La fraiseuse CNC de PRIMINER en service avec VibroCut *ultrasonic*

La C500-5X de PRIMINER est un centre d'usinage 5 axes qui se distingue par une précision et une flexibilité remarquables. Avec ses 9,5 tonnes, elle est idéalement conçue pour l'usinage complexe de pièces sur cinq axes et permet de fabriquer des composants de haute précision dans divers matériaux comme l'acier, l'aluminium et les plastiques. Polyvalente, elle convient à de nombreuses applications, du prototype à la production en série.

Par ses caractéristiques techniques, la C500-5X se prête parfaitement à l'équipement VibroCut *ultrasonic*. Elle répond très bien aux exigences que la rectification et le perçage assistés par ultrasons de matériaux durs et fragiles imposent à la machine.



Caractéristiques techniques		C500-5X
Table		
Diamètre max. de la pièce	mm	700
Dimensions de la table	mm	Ø 500 x 400
Rainure en T (larg. x nb x entraxe)	mm	14 ×80 ×5
Charge max.	kg	300
Course		
Course X/Y/Z	mm	700 / 550 / 500
Course A/C	Degrés	+30° ~ -120° / 360°
Nez de broche à la table	mm	120 - 620
Broche		
Cône de broche	-	SK40/BBT40/CAT40
Puissance du moteur de broche	kW	9 / 22
Couple du moteur de broche	Nm	63 / 135
Vitesse de broche	tr/min	12000
Avance		
Avance rapide X/Y/Z	m/min	48
Vitesse de rotation A/C	tr/min	50/60
Avance de travail	mm/min	1-12000

Caractéristiques techniques		C500-5X
Changeur d'outils		
Nombre d'outils	pcs	40
Longueur d'outil max.	mm	300
Diamètre d'outil max.	mm	Ø 80 / Ø 125
Poids d'outil max.	kg	8
Précision (VDI 3441, course complète) Précision de positionnement (sans règles linéaires)	mm	0,008 (X/Y/Z)
Répétabilité (sans règles linéaires)	mm	0,006 (X/Y/Z)
Positionnement (avec règles linéaires)	mm	0,006 (X/Y/Z)
Répétabilité (avec règles linéaires)	mm	0,004 (X/Y/Z)
Dimensions et poids		
Dimensions	mm	3976×4965×3050
Poids	kg	7000

N'hésitez pas à nous contacter directement ou à consulter notre site web :

PRIMINER

PRIMINER
Werkzeugmaschinen GmbH
Tungendorfer Str. 10
24536 Neumünster
info@priminer.de
www.priminer.de

UNITECH-Maschinen GmbH — partenaire renommé de la construction mécanique

UNITECH-Maschinen GmbH compte parmi les entreprises établies de la construction mécanique dans la région de Chemnitz. Son activité va de la conception à la fabrication et à la vente, jusqu'au service complet pour de nombreux types de machines-outils. L'élaboration de solutions complètes, le conseil technologique et la formation des utilisateurs font aussi partie de son offre.

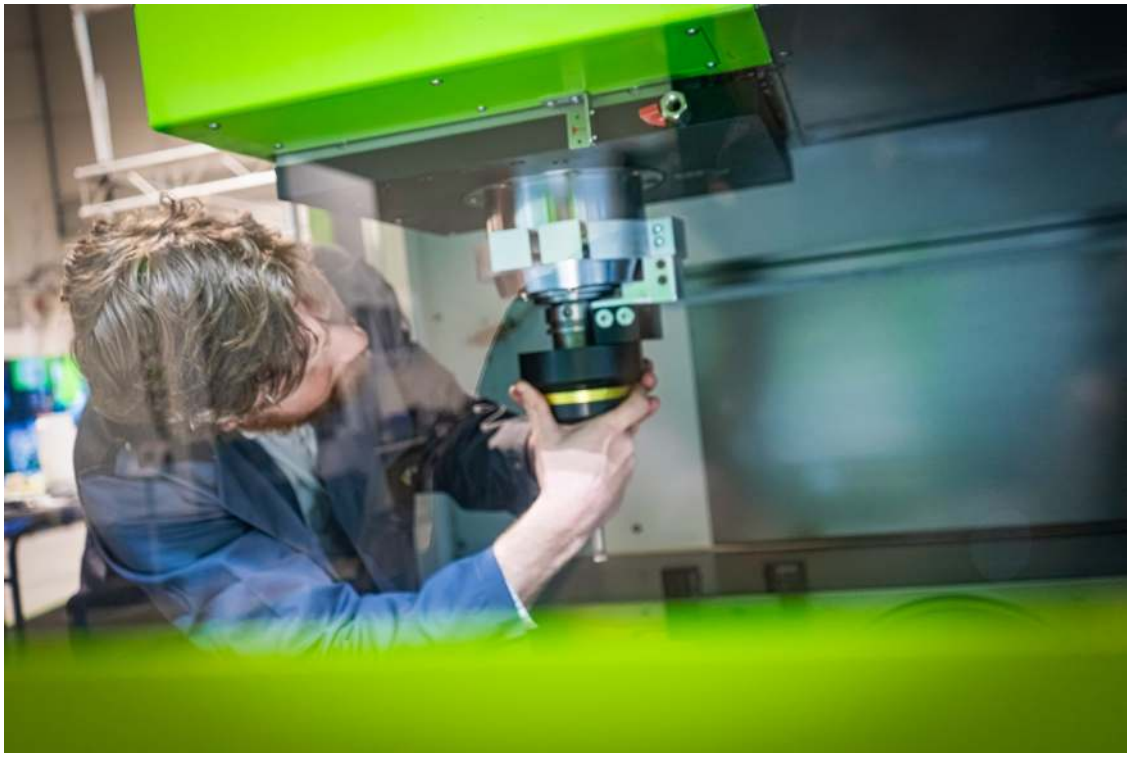
La proximité avec VibroCut GmbH et la distribution des machines Priminer ont donné naissance à une excellente coopération.

Le partenaire d'intégration de VibroCut GmbH pour l'usinage des matériaux durs et fragiles est UNITECH-Maschinen GmbH. En expert des modifications technologiques de machines-outils et partenaire de service expérimenté, UNITECH a fait du centre d'usinage 5 axes de haute précision PRIMINER C500 la rectifieuse Ultrasonic la plus puissante de sa catégorie.

L'outil de rectification VibroCut Ultrasonic, le guidage de l'opérateur et la surveillance du procédé ont été entièrement intégrés à la machine. Celle-ci a notamment reçu un capotage élaboré qui la protège durablement des poussières d'usinage agressives.

Le fluide d'usinage est séparé des poussières et amené de façon ciblée au procédé. Si nécessaire, en cas d'emploi de fluides à risque d'explosion, la machine peut être complétée par des mesures de protection incendie.

Pour sécuriser l'usinage sans opérateur sur plusieurs postes, la surveillance du procédé et de la qualité est intégrée.



Intégration technologique par UNITECH-Maschinen GmbH et le Dr Oliver Georgi de VibroCut GmbH

N'hésitez pas à nous contacter directement ou à consulter notre site web :

UNITECH

UNITECH-Maschinen GmbH
Clemens-Winkler-Straße 6
09116 Chemnitz
www.unitech-maschinen.de