XXV CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
Santander, 10-13 junio 2025
UC Universidad de Cantabria
IFToMM

Estudio de la influencia de los parámetros de diamantado en el súper-acabado de aceros de alta dureza usando muelas elásticas

Leire Godino[1], Daniel Perez de Nanclares[1], Einar Martín[1]; José Antonio Sánchez[1], Iñigo Pombo[1]

[1] *Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU, leire.godino@ehu.eus*

El rectificado es un proceso de acabado que desempeña un papel crucial en una amplia gama de industrias, como la mecánica, la automoción, la aeroespacial, la construcción y la médica. Dado que los sectores más avanzados demandan cada vez productos de más alto valor añadido, es necesario redefinir los procesos de rectificado convencionales para satisfacer estas exigentes expectativas. Entre otros nuevos enfoques, esto ha llevado a centrarse cada vez más en las técnicas de súper-acabado. En la industria aeroespacial, el súper-acabado es clave para producir piezas de alta precisión y alto rendimiento. Si la muela experimenta un desgaste excesivo o falla, puede comprometer la calidad superficial y sub-superficial de las aleaciones aeroespaciales. Las superficies rugosas o las tensiones residuales de tracción afectan negativamente a la resistencia a la fatiga y la corrosión de estas piezas. En la industria del automóvil, el cambio hacia la producción de vehículos eléctricos ha modificado significativamente el mercado. Los fabricantes de motores eléctricos imponen requisitos más estrictos en cuanto a precisión y calidad superficial, lo que convierte el súper-acabado en un proceso esencial. Para piezas críticas como los ejes de engranajes, el súper-acabado es necesario para crear superficies lisas e inducir tensiones residuales de compresión. Elegir el proceso y las condiciones adecuadas es esencial para mejorar la resistencia a la fatiga de estos componentes mecánicos.

Este artículo examina las capacidades de súper-acabado de las muelas elásticas con aglomerante de corcho y caucho en el rectificado de acero templado F1250. Dado que la topografía superficial de la muela es un aspecto crítico en cualquier operación de alta precisión, este trabajo de investigación se centra en la influencia del proceso de diamantado en los resultados finales del súper-acabado. En el trabajo se muestran pruebas experimentales en condiciones industriales utilizando diferentes estrategias de diamantado. Los resultados muestran que tanto la relación de solapamiento como la profundidad de pasada del diamantado son críticas para alcanzar los extremadamente bajos niveles de rugosidad superficial esperados.

Nomenclatura

Variable	Definición	Unidades
a_d	Profundidad de pasada del diamantado	mm
Agg	Agresividad	-
b_d	Ancho del diamantador	mm
d_w	Diámetro de pieza	mm
n_w	Revoluciones por minuto de la pieza	rpm
q_s	Ratio de velocidades	-
Q'_w	Caudal específico de viruta	mm^2/min
U_d	Ratio de solapamiento	-
v_d	Velocidad de avance del diamantador	mm/min
v_f	Velocidad de avance en rectificado	m/min
v_s	Velocidad de rotación (periférica) de muela	m/s
EK400MFP	Especificación muela de poliuretano	-
400FK223B	Especificación muela de caucho	-

1. Introducción

El rectificado es un proceso de acabado que desempeña un papel crucial en una amplia gama de industrias, incluidos los campos mecánico, automotriz, aeroespacial, de la construcción y médico [1]. Dado que los productos de alto valor añadido son cada vez más demandados por los sectores avanzados, los procesos de rectificado convencionales deben redefinirse para cumplir con estas desafiantes expectativas. Entre otros nuevos enfoques, esto ha llevado a un creciente desarrollo en las técnicas de superacabado.

Por ejemplo, en la industria aeroespacial, el superacabado es clave para producir piezas de alta precisión y alto rendimiento [2]. Si la muela abrasiva experimenta un desgaste excesivo, puede comprometer la calidad de la superficie de las aleaciones aeroespaciales y causar daños significativos en la subsuperficie, lo que afecta negativamente su rendimiento operativo. Las superficies rugosas o las tensiones de tracción residuales también pueden disminuir la resistencia a la fatiga y aumentar la corrosión de estas piezas [3]. La industria automotriz, por su parte, se centra en aumentar la fiabilidad de los componentes y reducir los costes de producción. El cambio hacia la producción de vehículos eléctricos ha cambiado significativamente el panorama de la fabricación de automóviles, incluida la forma en que se fabrican los componentes y los sistemas [4]. A medida que los vehículos eléctricos priorizan el rendimiento, la necesidad de tecnología avanzada de superacabado ha aumentado entre los proveedores de automóviles. Los fabricantes de vehículos eléctricos están imponiendo exigencias más estrictas en cuanto a precisión y calidad de la superficie, posicionando el superacabado como un proceso esencial en su producción. Para piezas críticas como ejes de engranajes, el superacabado es necesario para crear superficies lisas e inducir tensiones residuales de compresión. La elección del proceso y las condiciones adecuadas son esenciales para mejorar la resistencia a la fatiga de estos componentes mecánicos [5].

Hashimoto et al. [6] categorizaron las diferentes tecnologías de superacabado, proporcionando una visión general de sus fundamentos y un breve trasfondo histórico. El trabajo incluye una explicación de los procesos de eliminación de material, los requisitos energéticos específicos y las propiedades de acabado de cada método, ofreciendo una evaluación de las superficies resultantes. Además, se presentan pautas para seleccionar los métodos más adecuados, junto con estudios de casos que demuestran la efectividad de diversas técnicas. Entre los procesos de superacabado, el acabado con banda es ampliamente utilizado y conocido por su capacidad para inducir tensiones residuales de compresión y baja rugosidad superficial [7, 8]. Sin embargo, requiere el uso de maquinaria adicional, lo que resulta en un aumento de tiempo y costo.

Las muelas abrasivas elásticas son herramientas abrasivas avanzadas diseñadas para tareas precisas de pulido y acabado. A diferencia de las muelas convencionales, cuentan con un material aglomerante flexible que se adapta a los contornos de la superficie de trabajo [9]. Esta flexibilidad permite eliminar suavemente el material al tiempo que minimiza el riesgo de daños o distorsión en la superficie. Un beneficio clave de estas muelas es su compatibilidad con las rectificadoras convencionales, lo que permite realizar tanto el rectificado como el superacabado en el mismo equipo. Esta doble funcionalidad ayuda a reducir el tiempo y los costes de producción. Los materiales aglomerantes utilizados en las muelas abrasivas elásticas son principalmente compuestos a base de caucho, poliuretano y resina [10]. El poliuretano ofrece un equilibrio entre flexibilidad y durabilidad, lo que lo hace adecuado para aplicaciones más exigentes [11]. Las muelas de resina, a menudo hechas de resinas fenólicas o epoxi, proporcionan una estructura más resistente al tiempo que mantienen cierta flexibilidad, lo que garantiza que los granos abrasivos se sujeten de forma segura. El caucho es uno de los materiales más comunes debido a su alta elasticidad, flexibilidad y capacidad para resistir el desgaste. En las muelas de caucho, los granos abrasivos se recubren con resina para evitar que los granos más pequeños se incrusten en la matriz de caucho. Estos gránulos

recubiertos de resina, de aproximadamente 100 μm de tamaño, se distribuyen uniformemente dentro del caucho [12]. La principal ventaja de utilizar herramientas de rectificado con caucho u otros aglomerantes elásticos radica en sus propiedades de amortiguación superiores, que les permiten lograr una rugosidad superficial a escala nanométrica.

El comportamiento de este tipo de muelas está fuertemente condicionado por su elasticidad, lo que conlleva efectos que no se observan con las muelas vitrificadas. Las deformaciones inducidas tanto por las fuerzas centrífugas como por el contacto hacen que el volumen real de material eliminado esté muy lejos del teórico. Por estas razones, la velocidad de corte de estas muelas suele ser baja, en el rango de 25-30 m/s, y puede alcanzar los 50 m/s en algunas ruedas de poliuretano más duras.

Otro fenómeno interesante descrito por Brinksmeier et al. [13] es la necesidad de alcanzar una cierta fuerza de contacto antes de que se produzca el efecto de pulido. Los autores analizan el comportamiento de las muelas abrasivas de poliuretano y las comparan con las muelas vitrificadas en el superacabado de acero con bajo contenido de carbono. La estrategia siempre parte de una rugosidad inicial suficientemente baja (del orden de Rz 4 μm), alcanzando valores mínimos de Rz inferiores a 1 μm con muelas abrasivas de poliuretano de grano #600. Los efectos observados incluyen un aumento de las fuerzas normales y el desarrollo de tensiones residuales de compresión en la superficie pulida.

Las muelas abrasivas elásticas también se pueden utilizar junto con muelas aglomeradas vitrificadas durante los procesos de generación continua y pulido final de engranajes. Después del acabado convencional, los engranajes se someten a un procesamiento posterior para lograr la rugosidad superficial deseada. Las técnicas comunes para el superacabado incluyen el rectificado vibratorio asistido químicamente y el pulido con herramientas elásticas. En [14], se propone un tornillo sin fin de dos secciones para el súper acabado de los engranajes. La primera sección utiliza una muela vitrificada para el desbaste y el semiacabado, seguida de una segunda sección con una muela elástica para el pulido. Si bien los resultados demuestran el potencial de este método, se necesita más investigación.

El efecto del tamaño de grano de las muelas abrasivas de poliuretano en el superacabado de engranajes de acero endurecido también se ha estudiado en [15]. De nuevo, la estrategia es partir de una rugosidad inicial en torno a los 3-4 μm Rz (conseguida con muelas vitrificadas) y luego eliminar las crestas con muelas elásticas. Los autores informan valores de Ra = 0,17 μm cuando se utiliza un tamaño de grano #800.

La revisión de la literatura muestra un creciente interés en el desarrollo de la tecnología de muelas abrasivas elásticas para operaciones de superacabado, de modo que el prerectificado con muelas abrasivas convencionales y el superacabado con muelas elásticas se pueden realizar en rectificadoras industriales sin necesidad de equipos adicionales. Dentro de las muelas elásticas, el aglomerante más popular es el poliuretano, con numerosos productos comerciales disponibles hoy en día de los principales fabricantes.

Este artículo examina las capacidades de súper-acabado de las muelas elásticas con aglomerante de corcho y caucho en el rectificado de acero templado F1250. Dado que la topografía superficial de la muela es un aspecto crítico en cualquier operación de alta precisión, este trabajo de investigación se centra en la influencia del proceso de diamantado en los resultados finales del súper-acabado. En el trabajo se muestran pruebas experimentales en condiciones industriales utilizando diferentes estrategias de diamantado. Los resultados muestran que tanto la relación de solapamiento como la profundidad de pasada del diamantado son críticas para alcanzar los extremadamente bajos niveles de rugosidad superficial esperados.

2. Metodología experimental

La razón principal para usar muelas con aglomerante de corcho-caucho es su menor expansión bajo el efecto de las fuerzas centrífugas. En la actualidad, la mayoría de las operaciones de superacabado por rectificado se realizan con muelas elásticas aglomeradas con poliuretano. Sin embargo, estas muelas exhiben grandes expansiones radiales de hasta 300 μm cuando giran a velocidades de corte de 30 m/s. Este fenómeno dificulta el ajuste fino del proceso de rectificado, lo que resulta en errores dimensionales en las piezas de trabajo. Además, en el caso de las muelas helicoidales compuestas (vitrificadas + elásticas), esta expansión es aún más perjudicial ya que, dentro de la misma muela, la zona vitrificada tiene una expansión que es dos órdenes de magnitud menor que la de la zona de la muela elástica. El uso de un aglomerante de corcho-caucho está destinado a proporcionar una solución más viable a este problema al reducir la expansión de la muela abrasiva.

Las pruebas de superacabado se llevan a cabo en la rectificadora de diámetro exterior DANOBAT FG 600-S, con una potencia de 15kW. El refrigerante utilizado es una emulsión de aceite a base de agua al 5%. Las probetas utilizadas en los ensayos son piezas cilíndricas de acero templado F1250 con una dureza de 55 HRC. La longitud de la pieza es de 300 mm y el diámetro es de 43 mm. La Figura 1 muestra la configuración de la máquina, y la Tabla 1, las especificaciones de máquina, material de pieza, diamantador y taladrina.

Figura 1: Configuración de la máquina.

Tabla 1: Especificaciones de máquina y utillajes.

Máquina	Rectificadora Cilíndrica Danobat FG 600-S
Pieza	Acero F-1250 templado 55HRC, d_w = 43 mm
Diamantador	5 puntas 16W-18D1-47L-10D-5ST, ED10 (MDD-G21)
Taladrina	Emulsión base agua al 5%, Caudal = 96 l/min, Presión 22 bar

Para el estudio se han seleccionado dos muelas elásticas de diferente familia. Por un lado, una muela con ligante de poliuretano de la empresa Artifex, con especificación EK400MFP. Por otro lado, una alternativa de menor expansión radial en corcho-caucho de la empresa Abrasivos Manhattan, con especificación 400FK 223B.

Tabla 2: Muelas elásticas de Poliuretano y Corcho-caucho para el estudio.

Muela	**Dimensiones**	**Ligante**
400FK223B	450x20x203,2	Poliuretano
EK400MFP	450x20x203,2	Corcho-caucho

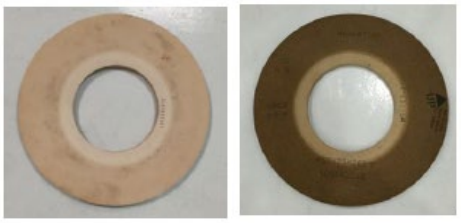

Figura 2: Imagen de las muelas elásticas. A la izquierda, la muela de ligante poliuretano; a la derecha, la muela de ligante corcho-caucho.

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia de los parámetros de diamantado en el proceso de superacabado con muelas elásticas. Para ello, se realizan las cuatro operaciones de diamantado representadas en la Tabla 3, en las que van a variar la profundidad de pasada a_d y el avance v_d.

Tabla 3: Parámetros para las pruebas de diamantado.

Nº Ensayo	v_s **(m/s)**	b_d **(mm)**	a_d **(µm)**	U_d	v_d **(mm/min)**	**Nº Pasadas**
P1	30	0,8	0,2	5,66	180	6
P2	30	0,8	0,2	11,32	90	6
P3	30	0,8	0,3	5,66	180	6
P4	30	0,8	0,3	11,32	90	6
P5	30	0,8	0,005	11,32	90	6

Después de cada operación de diamantado se realiza una operación de plongee sobre la pieza para poder evaluar el efecto del acondicionamiento de la topografía de la muela. En base a la experiencia previa del grupo, se han definido los parámetros de rectificado que aparecen en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros de rectificado.

v_s **(m/s)**	n_w **(rpm)**	q_s	**Stock (mm)**	v_f **(m/min)**	Q'_w **(mm²/s)**	*Agg*	**Chispeo (s)**
35	30	557	0,02	0,112	0,23	18	30

3. Discusión de resultados

Se muestran en primer lugar los resultados de rugosidad obtenidos. La Figura 3 muestra los valores de rugosidad media aritmética R_a y rugosidad media R_z en micras para los diferentes ensayos. Atendiendo a las dos gráficas, en el caso del caucho parece que una mayor velocidad de avance, o lo que es lo mismo, un aumento del valor del ratio de solapamiento (U_d), mejora la rugosidad obtenida. Además, los mejores resultados se obtienen con la profundidad de pasada más baja. En el caso del poliuretano, los resultados son menos sensibles a los parámetros de diamantado.

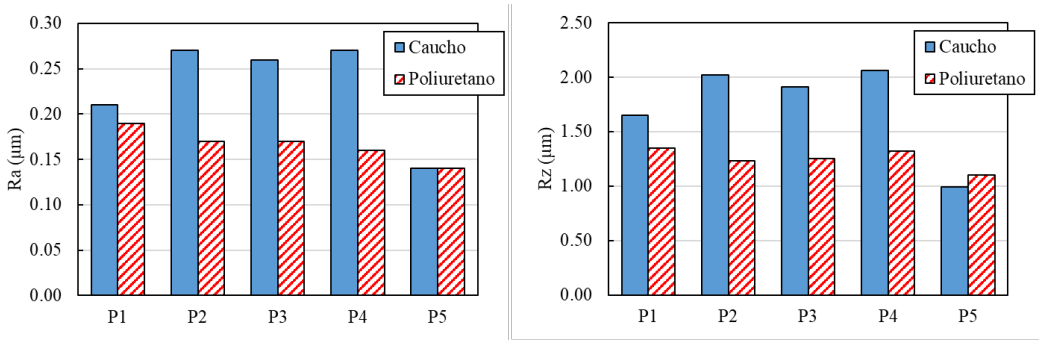

Figura 3: Valores de rugosidad Ra y Rz obtenidos en pieza con los diferentes parámetros de diamantado.

La Tabla 5 muestra los valores numéricos de los parámetros de rugosidad específicos de súper acabado como son R_{mr}, R_k, R_{pk} y R_{vk}. Estos resultados corresponden a la prueba con menor profundidad de pasada en el diamantado, lo que confirma los anteriores resultados.

Tabla 5: Mejores resultados obtenidos en los diferentes parámetros de rugosidad.

Muela	R_a (µm)	R_z (µm)	R_{mr} (%)	R_k (µm)	R_{pk} (µm)	R_{vk} (µm)
40FK223B	0,14	0,99	48,77	0,5	0,17	0,21
EK400MFP	0,14	1,1	53,68	0,42	0,15	0,24

La Figura 4 presenta una imagen del aspecto visual de la pieza rectificada y junto con el perfil de rugosidad medido con el rugosímetro. Las condiciones de diamantado de la prueba de menos profundidad de pasada permiten obtener una superficie cilíndrica libre de hélice y ondulaciones en la pieza.

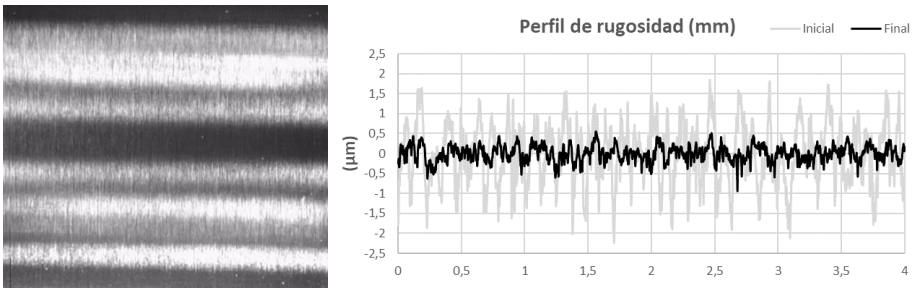

Figura 4: Izq: Aspecto visual de la pieza con las condiciones de diamantado de la prueba 5; Derecha: perfil de rugosidad libre de marcas de hélice.

Se analiza también la cantidad de material rectificado a partir de cada uno de los diferentes diamantados. Los resultados obtenidos se han representado en la Figura 5. Los valores de material retirado obtenidos son coherentes con los resultados de rugosidad, ya que se puede observar como el parámetro que más afecta a las características de la superficie de la muela es la profundidad de pasada (a_d). Los ensayos P1 y P2 se realizan con una profundidad de pasada de 0,02 mm, mientras que los ensayos P3 y P4 se realizan con 0,03 mm. Atendiendo la grafica se aprecia como en estos últimos dos ensayos la muela es capaz de retirar más material que en los anteriores. Además, observando el ensayo P5, en el que la profundidad de pasada es de 0,005 mm, la muela retira aún menos material que en los primeros dos ensayos. Esto significa que el parámetro a_d es de gran importancia a la hora de definir los parámetros de diamantado, ya que va a influir tanto en la rugosidad como en la cantidad de material retirado.

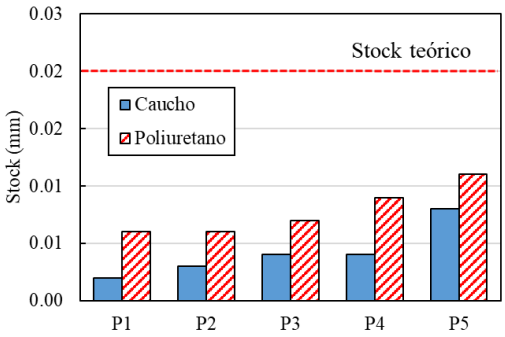

Figura 5: Resultados de la cantidad de material rectificado con las diferentes estrategias de diamantado.

Durante la operación de rectificado se han medido la fuerza tangencial y la potencia consumida por el cabezal de la máquina. Los resultados se muestran en la Tabla 6, en los que se ha variado el ratio de solapamiento a través de una variación en v_f. La muela de poliuretano consume hasta tres veces más potencia que la muela de caucho. Esto es coherente con los resultados de cantidad de material rectificado (Figura 5) y confirma que arranca más material y se deforma menos que la muela de caucho. Las fuerzas normales son de la misma magnitud en ambos casos, lo que es coherente con los resultados de rugosidad alcanzados. Sin embargo, y como ya se ha dicho, debido a la mayor expansión radial que muestra el poliuretano, resulta más complicado ajustar la tolerancia final de la pieza.

Tabla 6: Valores de potencia específica y fuerza normal específica medidos durante el rectificado diamantando con dos valores diferentes de velocidad de avance del diamantador.

Muela	v_f (mm/min)	Potencia específica (W/mm)	Fuerza específica (N/mm)
40FK223B	0,04	4,7	13,7
40FK223B	0,112	5	14
EK400MFP	0,04	13,1	13,9
EK400MFP	0,112	14,8	14

4. Conclusiones

Las operaciones de súperacabado con muela abrasiva están atrayendo mucho interés, sobre todo derivado de las necesidades de componentes del coche eléctrico. Para conseguir las rugosidades que exige la industria, las muelas elásticas son una buena opción, aunque debido a ser una tecnología muy novedosa presentan todavía muchas incertidumbres en su uso. En este artículo se presenta un estudio sobre la influencia de los parámetros de diamantado en la rugosidad final de la pieza. En el estudio se han incluido dos tipos muy diferentes de muelas elásticas: una muela de poliuretano comercial, y una muela de aglomerante corcho-caucho de composición similar a las que se utilizan en rectificados sin centros. Ambas presentan la particularidad de que, debido a su elasticidad, su forma se adapta a la curvatura de la pieza rectificada, aumentando el área de contacto y favoreciendo el efecto de rozamiento sobre los picos de rugosidad. Los resultados muestran que la profundidad de pasada de diamantado es un parámetro crítico. En otras palabras, la topografía superficial que induce en la muela el proceso de diamantado determina en gran medida la rugosidad en la pieza cuando se usan muelas elásticas. La muela de corcho-caucho alcanza rugosidades similares a la comercial de poliuretano con la ventaja de que las fuerzas y potencias son hasta un 30% menores. La causa es la mayor expansión radial de las muelas de poliuretano, que no presenta la muela de corcho-caucho, y que dificulta controla las condiciones de contacto con la pieza.

5. Referencias

[1] Li M., Zhu X., Kang R., Li J., Xu J., Li, T. Simulation modeling of wafer grinding surface roughness considering grinding vibration. Precision Engineering, 91, 278–289. (2024). https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2024.09.002

[2] Li C., Hu Y., Wei Z., Wu C., Peng Y., Zhang F., Geng Y. Damage evolution and removal behaviors of GaN crystals involved in double-grits grinding. International Journal of Extreme Manufacturing, 6(2), 025103. (2024). https://doi.org/10.1088/2631-7990/ad207f

[3] Ma L., Sun Z., Zhang L., Deng H., Tan Y., Kong Z., Wei Z. Study on mechanism and theoretical model of tool wear in fluorophlogopite glass-ceramics turning. Journal of Materials Processing Technology, 275, 116284. (2020). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116284

[4] Krajnik P., Hashimoto F., Karpuschewski B., da Silva E. J., Axinte, D. Grinding and fine finishing of future automotive powertrain components. CIRP Annals, 70(2), 589–610. (2021). https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.05.002

[5] Cherguy O., Cabanettes F., Han S., Rech, J. Modeling surface roughness profiles generated by the belt finishing process of a 27MnCr5 carburized steel. Precision Engineering, 88, 148–163. (2024). https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2024.01.015

[6] Hashimoto F., Yamaguchi H., Krajnik P., Wegener K., Chaudhari R., Hoffmeister H.W., Kuster F. Abrasive fine-finishing technology. CIRP Annals, 65(2), 597–620. (2016). https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.003

[7] Wang W., Salvatore F., Rech J., Li J. Effects of belt's adhesive wear on surface integrity in dry belt finishing. Procedia CIRP, 71, 31–34. (2018). https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.018

[8] Cherguy O., Elicegui U., Cabanettes F., Han S., Cici M., Pascal H., Rech J. Effect of abrasive grains size on surface integrity during belt finishing of a 27MnCr5 carburized steel. Procedia CIRP, 108, 305–310. (2022). https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.052

[9] Beaucamp A., Kirsch B., Zhu W. Advances in grinding tools and abrasives. CIRP Annals, 71(2), 623–646. (2022). https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.05.003

[10] Brinksmeier E., Mutlugünes Y., Klocke F., Aurich J. C., Shore P., Ohmori H. Ultra-precision grinding. CIRP Annals, 59(2), 652–671. (2010). https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.001

[11] Liu J. H., Pei Z. J., Fisher G. R. Grinding wheels for manufacturing of silicon wafers: A literature review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(1), 1–13. (2007). https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.02.003

[12] Yoshihara N., Yan J. W., Kuriyagawa T. Development of a Rubber-Bonded Grinding Wheel - Studies on Aspherical Grinding -. Key Engineering Materials, 329, 465–470. (2007). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.329.465

[13] Brinksmeier E., Heinzel C., Bleil N. Superfinishing and grind-strengthening with elastic bonding system. Journal of Materials Processing Technology, 209(20), 6117–6123. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.027

[14] Schrank M., Brimmers J., Bergs T. (2021). Potentials of vitrified and elastic bonded fine grinding worms in continuous generating gear grinding. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 5(1). (2009). https://doi.org/10.3390/jmmp5010004

[15] Heinzel C., Wagner A. Fine finishing of gears with high shape accuracy. CIRP Annals, 62(1), 359–362. (2013). https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.070