

# Abrasive machining process supported by electrochemical dissolution and electrical discharges – state of the art and directions of development

## Obróbka ścierna wspomagana roztwarzaniem elektrochemicznym i wyładowaniami elektrycznymi – stan badań i kierunki rozwoju

ADAM RUSZAJ  
MARIUSZ CYGNAR  
MARCIN GRABOWSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.10.85>

For finishing machining parts made of alloyed steels, composite or ceramic materials hybrid methods as abrasive machining supported by electrochemical dissolution or/and electrical discharges are often applied. The range of these processes practical applications in industry significantly increases. Because of this fact in the paper results of investigations and examples of practical applications of the mentioned hybrid abrasive processes are presented.

**KEYWORDS:** special materials, hybrid methods, electrochemical abrasive machining, electrodischarge abrasive machining

Do obróbki wykończeniowej specjalnych stali stopowych, materiałów kompozytowych czy ceramicznych stosuje się zwykle metody hybrydowe, takie jak: obróbka ścierna wspomagana roztwarzaniem elektrochemicznym czy wyładowaniami elektrycznymi. Udział tych procesów w zastosowaniach przemysłowych istotnie wzrasta. Z tego względu w artykule przedstawiono aktualne wyniki badań i zastosowania wymienionych hybrydowych procesów obróbki ścierniej.

**SŁOWA KLUCZOWE:** materiały specjalne, metody hybrydowe, obróbka elektrochemiczno-ścierna, obróbka elektroerozyjno-ścierna

### Wprowadzenie

We współczesnym przemyśle bardzo ważne jest zapewnienie dokładności wymiarowej oraz odporności na zużycie wytwarzanych elementów. Zapewnienie wysokiej odporności na zużycie wymaga zwykle zastosowania nowoczesnych stali wysokostopowych, materiałów ceramicznych czy kompozytowych na podstawie z ceramiki lub metalu. W artykule ograniczono rozważania do przypadku obróbki ścierniej zapewniającej uzyskanie elementów o odpowiedniej dokładności wymiarowej oraz powierzchni o zadowalającej mikrostrukturze i dobrych właściwościach mechanicznych (wysokiej: twardości, wytrzymałości, wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na zużycie itp.).

Wymagania takie są częste w przemyśle lotniczym, medycznym czy samochodowym. W operacjach kształtowania wykończeniowego elementów wykonanych ze stali wysokostopowych, materiałów ceramicznych i materiałów kompozytowych na podstawie z ceramiki lub metalu istotną rolę odgrywają procesy hybrydowe. Zgodnie z definicją CIRP: hybrydowe procesy wytwarzania bazują na równoczesnej i kontrolowanej interakcji pomiędzy mechanizmami procesu i/lub źródłami energii/narzędziami, wywierającej istotny wpływ na przebieg i wyniki procesu. Równoczesna i kontrolowana interakcja oznacza, że procesy,

źródła energii czy narzędzia powinny oddziaływać mniej więcej w tym samym obszarze procesu i w tym samym czasie. Można zastosować szlifowanie elektrochemiczne czy szlifowanie elektroerozyjne lub szlifowanie elektrochemiczne-elektroerozyjne – głównie w przypadku obróbki materiałów przewodzących prąd elektryczny. W artykule zostaną uwzględnione szczególne przypadki obróbki materiałów nieprzewodzących prądu elektrycznego.

Specjalne stale stopowe, materiały ceramiczne, materiały kompozytowe na osnowie z metalu lub ceramiki przy odpowiednio dobranym składzie mają bardzo dobre właściwości mechaniczne (wysoką: twardość, wytrzymałość, wytrzymałość zmęczeniową, odporność na zużycie itp.). Takie właściwości utrudniają, a w wielu przypadkach uniemożliwiają obróbkę metodami mechanicznymi (skrawaniem, szlifowaniem). Często jedynym rozwiązaniem w obróbce wykończeniowej jest zastosowanie szlifowania wspomaganego roztwarzaniem elektrochemicznym lub wyładowaniami elektrycznymi [1–3].

### Obróbka elektrochemiczno-ścierna

W procesie obróbki elektrochemiczno-ścierniej naddatek jest usuwany w wyniku roztwarzania elektrochemicznego i mikroskrawania ziarnami ściernymi. Na skutek reakcji elektrochemicznych na powierzchni obrabianego elementu tworzy się warstwa tlenków i wodorotlenków o właściwościach mechanicznych istotnie słabszych niż rodzimego materiału. Warstwę tę można stosunkowo łatwo usunąć ziarnami ściernymi. Procesy te wspomagają się wzajemnie. Usuwanie ziarnami ściernymi warstwy tlenków i wodorotlenków działa depasywująco na powierzchnię obrabianą i ułatwia dostęp elektrolitu do jeszcze nieroztworzonego materiału. Z kolei w procesie mikroskrawania występują mniejsze niż w klasycznym szlifowaniu siły, co zwiększa żywotność ziaren ściernych, a tym samym i żywotność ściernicy [2, 3].

Obróbkę elektrochemiczno-ścierną można zastosować do różnych zaawansowanych materiałów (Inconelu, Nimonicu, stopów tytanu, stopów niklu, PCD-Co, Al-SiC, Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> czy Ti-6Al-4V) i w różnych odmianach kinematycznych (szlifowaniu, gładzeniu elektrochemicznym, obróbce luźnym ścierniwem). W zależności od wariantu obróbki można nawet uzyskać powierzchnie o  $Ra \ll 0,1 \mu\text{m}$ . Szlifowanie elektrochemiczne zastosowano m.in. do obróbki wykończeniowej powierzchni elementów wykonanych z Ti-6Al-4V po zgrubnej obróbce elektroerozyjnej (EDM) [4, 5].

\* Prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj, [ruszaj@mech.pk.edu.pl](mailto:ruszaj@mech.pk.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0002-1809-3271> – Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu, Polska; Politechnika Krakowska, Kraków, Polska  
Dr hab. inż. Mariusz Cygnar, [mcygnar@pwsz-ns.edu.pl](mailto:mcygnar@pwsz-ns.edu.pl) – Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu, Polska  
Dr inż. Marcin Grabowski, [marcin.grabowski@mech.pk.edu.pl](mailto:marcin.grabowski@mech.pk.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0003-1482-6738> – Politechnika Krakowska, Kraków, Polska

Dzięki dobrej odporności na korozję stopy tytanu są popularne w wielu gałęziach przemysłu. Jednak ich obróbka jest trudna ze względu na niską przewodność cieplną, aktywność chemiczną i niski moduł plastyczności. Do obróbki zgrubnej często stosuje się drażenie EDM. Jednak powierzchnia po zgrubnej obróbce EDM ma stosunkowo dużą chropowatość, niejednorodne właściwości oraz lokalne uszkodzenia (np. mikropęknięcia) i zwykle nie spełnia wymagań wobec elementów lotniczych czy medycznych. Aby poprawić właściwości powierzchni, jako obróbkę wykończeniową stosuje się szlifowanie elektrochemiczne.

Jako narzędzie zastosowano ściernicę na spoiwie miedziowym: EC BOND A100V4CD – o średnicy  $\varnothing 350$  mm i szerokości 70 mm. Próby szlifowania elektrochemicznego przeprowadzono dla napięcia  $U = 2\div 8$  V, posuwu roboczego:  $6\div 24$  mm/min, elektrolitu  $\text{NaNO}_3$  o stężeniu 180 g/l. Grubość usuwanego nadkładu wynosiła kilkadziesiąt mikrometrów [4, 5]. W operacji szlifowania elektrochemicznego usunięto uszkodzenia warstwy wierzchniej (np. mikropęknięcia), a wartość  $R_a$  zmniejszono nawet do  $0,06 \mu\text{m}$ . Taka powierzchnia spełnia wymagania przemysłu lotniczego, samochodowego i medycznego.

Inne zastosowania szlifowania elektrochemicznego to np. obróbka wykończeniowa szczelin do mocowania łopatek w turbinach silników przepływowych po zgrubnej obróbce strugą wodno-ścierną (AWJM) [6] czy kół zębatych stożkowych [7]. W przypadku zwiększenia głębokości szlifowania w niektórych obszarach dochodzi do styku materiału obrabianego i metalowego spoiwa ściernicy, a w efekcie – do wyładowań zwarciovych. Zwiększa się wówczas prawdopodobieństwo wypełnienia szczeliny wodorem, a tym samym pojawiają się wyładowania elektryczne analogicznych jak w procesie EDM. Ten stan procesu szlifowania elektrochemicznego nazywa się szlifowaniem elektrochemiczno-elektroerozyjnym (ECDM). Charakteryzuje się on zwiększeniem wydajności obróbki w porównaniu ze szlifowaniem ECM, ale związanym zwykle z pogorszeniem właściwości warstwy wierzchniej.

Istotnym problemem technologicznym jest obróbka małych elementów z nieprzewodzącej ceramiki (np.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Rozwiązaniem jest tu oryginalne wykorzystanie zjawisk elektrochemicznych i wyładowań elektrycznych (jak na rys. 1). Zjawiska elektrochemiczne (wydzielanie wodoru na powierzchni katody-ściernicy) wykorzystuje się nie do usuwania nadkładu, ale do stworzenia warunków, aby zaszyły wyładowania elektryczne w szczelinie pomiędzy materiałem obrabianym a narzędziem-katodą. Stąd taka metoda nazywana jest również obróbką elektrochemiczno-elektroerozyjną (ECDM).

Jeżeli szlifowany materiał nie przewodzi prądu elektrycznego, to przepływ prądu jest realizowany pomiędzy

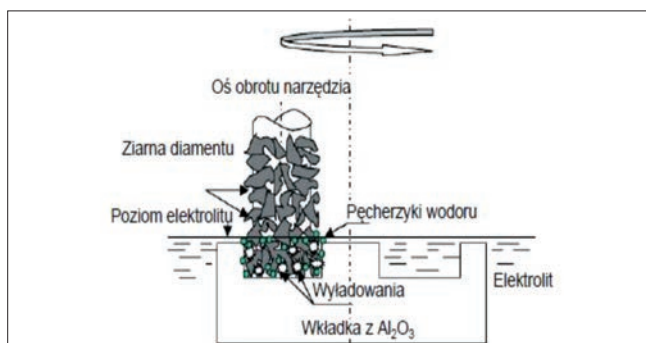


Fig. 1. Scheme of electrochemical and electrodischarge machining (ECDM) of elements made of non-conductive ceramics [1, 14]  
Rys. 1. Schemat obróbki elektrochemiczno-elektroerozyjnej (ECDM) elementów z nieprzewodzącej ceramiki [1, 14]

ściernicą-katodą a elektrodą pomocniczą. W takim przypadku również zachodzą na powierzchni katody reakcje elektrochemiczne wydzielania wodoru. Przestrzeń pomiędzy ziarnami ściernymi i materiałem szlifowanym jest niewielka i łatwo się wypełnia wodorem, w którym przy zasilaniu napięciem impulsowym występują wyładowania elektryczne usuwające nadatek z ceramicznego przedmiotu obrabianego.

Usuwanie nadkładu w wyniku wyładowań pozwala na osiągnięcie zadowalającej wydajności obróbki. Niestety warstwa wierzchnia powierzchni ukształtowanej w wyniku wyładowań charakteryzuje się stosunkowo dużą chropowatością i licznymi defektami (np. mikropęknięciami). Jednak usuwanie materiału w wyniku wyładowań obniża właściwości mechaniczne warstwy wierzchniej, co umożliwia ziarnom ściernym ukształtowanie jej struktury geometrycznej (zmniejszenie chropowatości i usunięcie lokalnych defektów). Ta odmiana procesu ECDM nazywana jest przez część badaczy *spark assisted chemical engraving* (SACE) [1–3].

W praktyce zastosowanie narzędzia ściernego w procesie SACE trudnoobrabialnej ceramiki nieprzewodzącej prądu elektrycznego pozwala na wykonywanie głębszych otworów (do 1,5 mm). Jakość ich powierzchni jest zdecydowanie lepsza, bo proces obróbki ścierniej zmniejsza chropowatość i usuwa defekty warstwy wierzchniej. Przyjmowane w praktyce parametry to: liczba obrotów elektrody-ściernicy  $275\div 600$  obr/min, amplituda napięcia do 300 V, natężenie prądu  $\sim 15$  A, czas impulsu napięcia  $\sim 0,25\div 1000$  ms, posuw  $\sim 0,002\div 2,00$  mm/min. Wydajność obróbki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dla tych parametrów wynosi  $5\div 30$  mm<sup>3</sup>/min.

Warto podkreślić, że proces SACE może znaleźć zastosowanie przy obróbce materiałów nieprzewodzących (np. szkła) w operacji wycinania drutem z zastosowaniem mieszaniny elektrolitu z ziarnami ściernymi. Obecność ziaren ściernych stabilizuje proces i umożliwia uzyskanie większej wydajności i lepszej jakości powierzchni w stosunku do procesu realizowanego w czystym elektrolicie [1].

## Obróbka elektroerozyjno-ścierna

Obróbka elektroerozyjno-ścierna jest procesem hybrydowym, w którym nadatek jest usuwany w wyniku oddziaływania na powierzchnię obrabianą ziaren ściernych. Właściwości usuwanej warstwy zmieniono w wyniku wyładowań elektrycznych (rys. 2, 3).

Proces szlifowania elektroerozyjnego (AEDG) zastosowano również w operacjach wycinania drutem z warstwą ścierniwa na powierzchni [9]. Proces AEDG sprawdza się m.in. w przypadku zastosowania mieszaniny dielektryka z ziarnami ściernymi [10]. Zadowalające oddziaływanie ziaren TiC na powierzchnię obrabianą uzyskano wówczas dzięki zjawisku kawitacji generującemu lokalnie wysokie ciśnienie i wysoką temperaturę. Zjawisko kawitacji intensyfikuje się zwykle przez wprowadzenie drgań ultradźwiękowych [10].

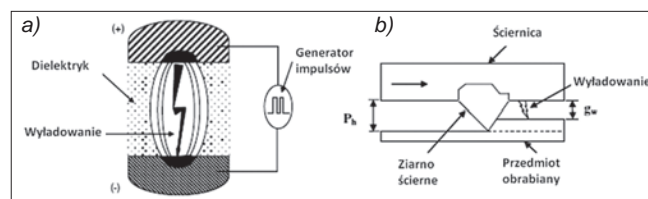


Fig. 2. Scheme explaining the principle of the abrasive process with bound grains and supported by electrical discharges [8]  
Rys. 2. Schemat wyjaśniający zasadę procesu obróbki ścierniej ziarnami związanymi wspomaganego wyładowaniami elektrycznymi [8]

Przykłady zastosowania obróbki ścierniej wspomaganiej wyładowaniami przedstawiono na rys. 4 i 5. W przypadku z rys. 4. wyładowania elektryczne zachodzą pomiędzy elementami stalowymi a przedmiotem obrabianym. Powierzchnia po obróbce EDM charakteryzuje się wysoką chropowatością i licznymi uszkodzeniami (np. mikropęknięciami). Segmenty ściernie wygładzają powierzchnię i usuwają jej uszkodzenia. Jeżeli zastosowanie segmentowej elektrody (rys. 4) jest niemożliwe, to obróbkę ceramiki SiC realizuje się dwuetapowo, w sposób przedstawiony na rys. 5. Najpierw w wyniku wyładowań elektrycznych zostaje usunięty zasadniczy naddatek. Na drugim etapie – już bez wyładowań – zostaje zmniejszona chropowatość i usuwa się uszkodzenia spowodowane wyładowaniami elektrycznymi.

Publikowane wyniki badań doświadczalnych wskazują na efektywność stosowania procesu AEDG zarówno wobec wysokowytrzymałych stopów, jak i ceramiki technicznej oraz MMC na bazie Al: whisker-SiCp oraz SiCp/A356, SiC/Al oraz na bazie Cu-Fe-C (grafit) [11, 12]. Szczegółowe badania obróbki MMCs: Cu (60%)-Fe (30%)-C (10%) przedstawiono w [12].

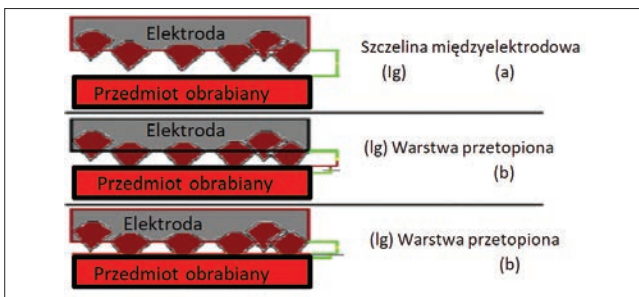


Fig. 3. As a result of electrical discharges, abrasive grains remove the remelted layer, which has better machinability than native material [4]  
Rys. 3. W wyniku wyładowań elektrycznych ziarna ściernie usuwają warstwę przetopioną, która ma lepszą skrawalność niż rodzimy materiał [4]

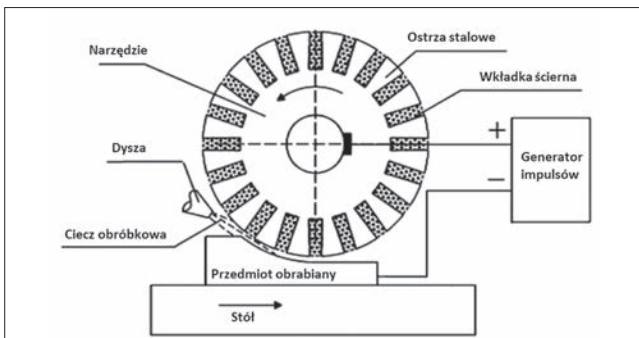


Fig. 4. Electrodischarge abrasive machining of ceramic elements (e.g. SiC) with a special segment electrode (a tool) [14]  
Rys. 4. Obróbka elektroerozyjno-ścierna elementów ceramicznych (np. SiC) specjalną segmentową elektrodą – narzędziem [14]

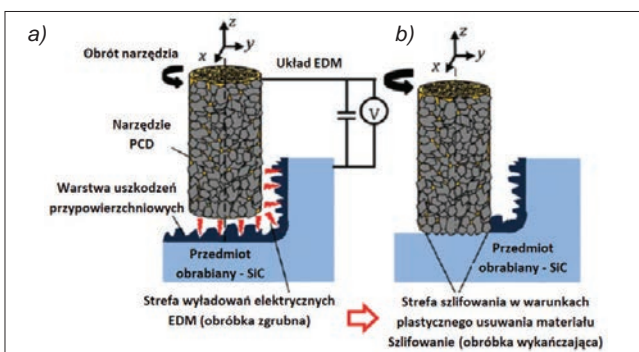


Fig. 5. Scheme of two-step microelement treatment with SiC [14]  
Rys. 5. Schemat obróbki dwuetapowej mikroelementu z SiC [14]

Efekty szlifowania elektroerozyjnego to przede wszystkim: zmniejszenie sił szlifowania, poprawa usuwania produktów skrawania z powierzchni ściernicy, a tym samym zapobieganie jej zalepianiu, odsłonięcie nowych ziaren ściernych i zwiększenie wolnej przestrzeni pomiędzy nimi, a tym samym poprawa właściwości skrawnych ściernicy i wydłużenie jej żywotności przez zmniejszenie tarcia pomiędzy materiałem obrabianym a spoiwem ściernicy.

## Podsumowanie

Procesy hybrydowe, takie jak obróbka ścierna wspomaganą roztwarzaniem elektrochemicznym oraz wyładowaniami elektrycznymi, są szeroko stosowane w operacjach wykończeniowych elementów wykonanych z materiałów trudnoskrawalnych. W procesach tych wykorzystuje się ziarna ściernie połączone spoiwem (ściernice) lub tworzące mieszaninę z elektrolitem czy dielektrykiem. W tym drugim przypadku luźne ziarna ściernie wpływają na proces przez zmianę rozkładu pola elektrycznego oraz dynamiczne oddziaływanie na powierzchnię obrabianą w wyniku przepływu lub zjawiska kawitacji. W obszarze kawitacji można zaobserwować lokalnie wysokie ciśnienie i wysoką temperaturę. Wspomaganie procesu szlifowania zarówno roztwarzaniem elektrochemicznym, jak i wyładowaniami elektrycznymi polega przede wszystkim na obniżeniu właściwości mechanicznych warstwy usuwanej przez ziarna ściernie. Dzięki temu można efektywnie obrabiać materiały niemożliwe lub trudne do kształtowania tradycyjnymi metodami szlifowania.

## LITERATURA

- [1] Ruszaj A. „Niekonwencjonalne procesy kształtowania materiałów ceramicznych i kompozytowych”. *Mechanik*, 90, 3 (2017): 188–194, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.3.39>.
- [2] Lauwers B., Kocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., Micintosh D. “Hybrid processes in manufacturing”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 63, 2 (2014): 561–583, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>.
- [3] Lauwers W. “Surface integrity in hybrid machining processes”. *Procedia Engineering*, 19 (2011): 241–251, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.107>.
- [4] Hascalik A., Cydas U. “A comparative study of surface integrity of Ti-6Al-4V Alloy machined by EDM and AECG”. *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 1–3 (2007): 173–180, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprot.2007.02.048>.
- [5] Ruszaj A., Skoczypiec S. „Wybrane zagadnienia obróbki elektrochemiczno-ścierniej”. *Mechanik*, 88, 2 (2015): 103–105, <http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2015.2.20>.
- [6] Curtis D.T., Soo S.L., Aspinwall D.K., Sage C. “Electrochemical superabrasive machining of a nickel – based aeroengine alloy using mounted grinding points”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 58, 1 (2009): 173–179, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.074>.
- [7] Shaikh J.H., Jain N.K. “Modelling of material removal rate and surface roughness in finishing of bevel gears by electrochemical honing process”. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 2 (2014): 200–209, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprot.2013.08.010>.
- [8] Koshby P., Jain V.K., Lal G.K. “Grinding of cemented carbide with electrical spark assistance”. *Journal of Materials Processing Technology*, 72, 1 (1997): 61–68, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00130-1).
- [9] Menesis I., Koshy P. “Assessment of abrasion-assisted material removal in wire EDM”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 57, 1 (2008): 195–198, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.135>.
- [10] Chen Y.F., Lin Y.Ch. “Surface modification of Al-Zn-Mg alloy using combined EDM with ultrasonic machining and addition of TiC particles into dielectric”. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 9 (2009): 4343–4350, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprot.2008.11.013>.
- [11] Ruszaj A., Skoczypiec S. „Obróbka elektroerozyjno-ścierna – wybrane zagadnienia”. *Mechanik*, 88, 3 (2015): 210–215, <http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2015.3.107>.
- [12] Hrivastava P.K., Dubey A.K. “Experimental modeling and optimization of electric discharge diamond face grinding of metal matrix composite”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69, 9–12 (2103): 2471–2480, <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5190-8>.
- [13] Sanjay K., Chak P., Venkateswara R. “Trepanning of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by electrochemical discharge machining (ECDM) process using abrasive electrode with pulsed DC supply”. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 47 (2007): 2061–2070, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.05.009>.
- [14] Liew Pay Jun, Yan Jiwang “Micro-electrical Discharge Machining of Hard Brittle Materials”. *Micro and Nano Fabrication Technology* (ed. Yan Jiwang). Singapore: Springer Nature, 2018, [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0098-1\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0098-1_25).