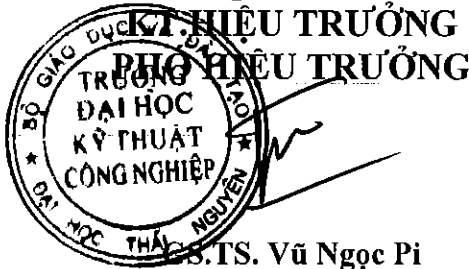


**ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KỸ THUẬT CÔNG NGHIỆP**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG**

**Nghiên cứu thực nghiệm sự ảnh hưởng của các thông số gia công lên sự phát tán bụi
trong khi phay tấm vật liệu composite
Mã số: T2022-B29**

**Xác nhận của tổ chức chủ trì
Cơ quan chủ trì**



**Chủ nhiệm đề tài
(ký, họ tên)**

PGS.TS. Nguyễn Đình Ngọc

THÁI NGUYÊN, NĂM 2024

Mục lục

ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN	1
THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU.....	4
INFORMATION ON RESEARCH RESULTS	5
Chương 1. Tổng quan về sự phát tán hạt bụi khi gia công vật liệu composite.....	1
Chương 2. Sự phát thải hạt bụi khi gia công vật liệu composite CFRP bằng dụng cụ PCD	3
2.1. Tổng quan tài liệu nghiên cứu về sự hình thành hạt bụi trong quá trình gia công vật liệu composite CFRP	3
2.2. Thiết lập quá trình nghiên cứu thực nghiệm.....	6
2.2.1. Các thông số của cấu hình vật liệu composite.....	6
2.2.2. Thông số cắt và hình dáng dụng cụ.....	7
2.2.3. Thiết lập gia công và định lượng số hạt bụi	8
2.3. Phân tích kết quả thực nghiệm.....	9
2.3.2. Phân tích số hạt bụi có hại tồn tại trong một lít không khí.....	11
2.3.1. Ảnh hưởng của hình dáng dụng cụ và thông số gia công đến số lượng hạt có hại	11
2.3.3. Ảnh hưởng của hao mòn dụng cụ đến số lượng hạt có hại.....	17
Tài liệu tham khảo chương 2	23
Chương 3. Nghiên cứu sự ảnh hưởng của các thông SỐ công nghệ và mòn dụng cụ cắt lên sự hình thành khuyết tật trong gia công vật liệu composite lớp	25
3.1. Các nghiên cứu liên quan	25
3.2. Quy trình xây dựng thí nghiệm gia công phay	27
3. Kết quả nghiên cứu.....	28
3.1. Phân tích các khuyết tật cảm ứng quan sát thấy trong bề mặt gia công	28
3.2. Ảnh hưởng của các thông số quá trình đến chất lượng gia công.....	31
3.3. Ảnh hưởng của bán kính lưỡi cắt đến chất lượng gia công	33
Tài liệu tham khảo chương 3	35
KẾT LUẬN	39

THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

1. Thông tin chung:

- Tên đề tài: Nghiên cứu thực nghiệm sự ảnh hưởng của các thông số gia công lên sự phát tán bụi trong khi phay tấm vật liệu composite
- Mã số: T2022-B29
- Chủ nhiệm: Nguyễn Đình Ngọc
- Cơ quan chủ trì: Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp
- Thời gian thực hiện: từ tháng 4 năm 2022 đến tháng 3 năm 2024

2. Mục tiêu:

- Đưa ra các chỉ dẫn về lựa chọn loại dụng cụ cắt, cũng như bộ thông số cắt tối ưu để giảm thiểu sự khuếch tán bụi trong gia công vật liệu composite.
- Dự đoán được nồng độ hạt và khối lượng của bụi khi gia công một loại vật liệu composite cụ thể.

3. Kết quả nghiên cứu:

Đánh giá được sự ảnh hưởng của các thông số tới quá trình tạo bụi và khuyết tật trên bề mặt khi gia công. Các kết quả này có thể được sử dụng để khuyến nghị cho quá trình chọn thông số tối ưu trong gia công vật liệu composite.

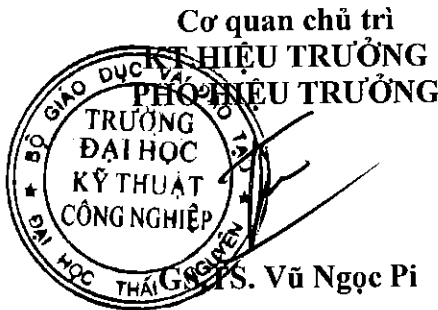
4. Sản phẩm:

- Sản phẩm đào tạo:
- Sản phẩm khoa học: 01 bài báo Scopus/Q4
- Sản phẩm ứng dụng:

5. Hiệu quả: Đạt 100% các sản phẩm khoa học như đã cam kết trong đề tài và kịp tiến độ.

6. Khả năng áp dụng và phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu: ứng dụng trong các nhà máy, xí nghiệp hay xưởng gia công vật liệu composite.

Ngày tháng năm 2024
Chủ nhiệm đề tài



PGS.TS. Nguyễn Đình Ngọc

INFORMATION ON RESEARCH RESULTS

1. General information:

Project title: Experimental study of the influence of machining parameters on dust dispersion while milling composite material panels

Code number: T2022-B29

Coordinator: Nguyen Dinh Ngoc

Implementing institution: Thai Nguyen University of Technology

Duration: from April, 2022 to March, 2024

2. Objective(s):

- Provide instructions on choosing the type of cutting tool, as well as the optimal set of cutting parameters to minimize dust diffusion in machining composite materials.
- Predict particle concentration and dust volume when machining a specific composite material.

3. Research results:

Evaluate the influence of parameters on the process of creating dust and defects on the surface during machining. These results can be used to make recommendations for the process of choosing optimal parameters in machining composite materials.

4. Products:

- An international journal indexed Scopus Q4

5. Effects:

Achieved 100% of scientific products as committed in the project and on schedule.

6. Transfer alternatives of reserach results andapplic ability:

Used in factories, plants or workshops processing composite materials.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ SỰ PHÁT TÁN HẠT BỤI KHI GIA CÔNG VẬT LIỆU COMPOSITE

Trong gia công vật liệu composite, thì gia công không sử dụng dung dịch trơn nguội (dry machining) luôn được khuyến dùng. Vì so với gia công có dung dịch trơn nguội, gia công khô có một nhiều lợi thế như giảm ô nhiễm môi trường, không hại da của công nhân, giảm giá thành loại bỏ và dọn dẹp phoi, không phải chi phí cho dung dịch trơn nguội. Tuy nhiên, việc gia công không sử dụng dung dịch trơn nguội thì quá trình gia công ngoài tạo ra các khuyết tật trên bề mặt được gia công, mòn dụng cụ cắt nhanh hơn, và đặc biệt là sự phát tán các hạt bụi vào trong không khí. Các hạt bụi này có nguồn gốc chính là sự vỡ vụn của phoi vật liệu composite. Các hạt bụi sẽ khuếch tán vào trong không khí. Công nhân có thể hít vào, và các hạt tùy theo kích thước có thể đi vào các bộ phận khác nhau trong hệ hô hấp của con người và gây ra các bệnh nguy hiểm về hô hấp. Đây là một vấn đề mang tính thiết thực rất cao đối với sức khỏe người lao động. Tuy nhiên, các nghiên cứu về gia công vật liệu composite thì hầu hết chỉ tập trung vào khảo sát các nguyên nhân gây ra khuyết tật gia công trên các bề mặt. Trong khi đó, có rất ít các nghiên cứu khảo sát các nguyên nhân ảnh hưởng tới sự phát tán số lượng hạt bụi vào không khí.

Việc phát sinh các khuyết tật nêu trên đi kèm với sự phát ra các hạt bụi mịn của sợi và vật liệu nền được gia công có đường kính cực nhỏ và các cạnh sắc. Các hạt này được phân tán và lơ lửng trong không khí, và người vận hành máy có thể hít phải. Chúng có khả năng làm hỏng hệ thống thở và gây kích ứng độc hại, và là chất gây ung thư. Việc sử dụng ngày càng nhiều vật liệu composite trong công nghiệp dẫn đến việc tiếp xúc thường xuyên hơn với các hạt bụi mịn. Cần phải giảm thiểu các hạt phát ra trong không khí để bảo vệ người vận hành khỏi các vấn đề sức khỏe đã đề cập [1-2]. Đáng ngạc nhiên là những vấn đề về hạt bụi do gia công vật liệu composite đã bị bỏ qua từ lâu và có rất ít nghiên cứu liên quan [3-4]. Do đó, các nghiên cứu sâu hơn về sự phát sinh bụi trong quá trình gia công vật liệu composite là cấp thiết và cần được cộng đồng nghiên cứu xem xét một cách nghiêm túc.

Haddad và cộng sự. [1] đã phân tích ảnh hưởng của hình dạng dụng cụ, thông số cắt (tốc độ cắt và tốc độ tiến dao) đối với các hạt bụi được tạo ra trong quá trình cắt vật liệu composite nhiều lớp (CFRP) ở hai phạm vi tốc độ cắt (tốc độ cắt tiêu chuẩn và tốc độ cắt cao). Đối với tốc độ cắt tiêu chuẩn, ba loại dụng cụ cắt bao gồm dụng cụ có gờ, có tráng phủ và không tráng phủ, và dụng cụ bốn lưỡi cắt có gờ đã được sử dụng, trong khi chỉ có dụng cụ có gờ không tráng phủ được sử dụng ở tốc độ cắt cao. Kết quả cho thấy ở tốc độ cắt tiêu chuẩn, hình dạng của dụng cụ ảnh hưởng đến số lượng các hạt có hại phát ra và các hạt bụi được tạo ra bởi dụng cụ bốn lưỡi cắt có gờ cao hơn so với những hạt được tạo ra khi sử dụng cả dụng cụ có gờ phủ và không tráng [5-7]. Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy rằng lớp phủ có ít tác động đến việc tạo ra các hạt bụi. Về ảnh hưởng của các thông số cắt, số lượng các hạt có hại tăng lên khi giảm tốc độ tiến dao và tăng tốc độ cắt trong cả hai trường hợp phạm vi tốc độ cắt. Tuy nhiên, nhóm tác giả cũng không giải thích cho các hiện tượng được đề cập trước đó đã được các tác giả đưa ra.

Gần đây, Nguyễn Đình Ngọc và cộng sự [4, 9] đã phân tích tác động của các thông số cắt (tốc độ cắt, tốc độ tiến dao, độ sâu cắt) và độ mòn của dụng cụ đối với số lượng các hạt có hại được tạo ra trong quá trình cắt mẫu CFRP (sử dụng dụng cụ PCD). Kết quả cho thấy rằng sự gia tăng tốc độ cắt và/hoặc giảm tốc độ tiến dao dẫn đến tăng nồng độ của các hạt có hại. Chiều hướng này tương tự như kết quả trình bày trong nghiên cứu của Haddad M và cộng sự [8]. Bên cạnh đó, số lượng các hạt có hại cũng giảm khi chiều dài gia công tăng lên. Có thể thấy rằng bề mặt thô ráp hơn có liên quan đến kích thước các hạt bụi lớn hơn. Như đã biết, các hạt bụi sinh ra trong quá trình gia công composite có thể bị hít vào bởi người vận hành trong khu vực gia công. Do đó, cần giảm thiểu các hạt bụi phát ra trong không khí. Để làm được điều này, tốt hơn là thu được các hạt có kích thước lớn hơn, vì chúng sẽ rơi ra ngay sau khi tách ra khỏi mẫu vật tổng hợp mà không phân tán vào không khí xung quanh. Kết quả này cho thấy gia công với tốc độ tiến dao cao làm giảm số lượng các hạt trong không khí. Tuy nhiên, việc vận hành với các thông số này để giảm phát thải bụi có thể làm phát sinh nhiều vấn đề quan trọng như tăng lực cắt mài mòn dụng cụ, nhiệt độ.

CHƯƠNG 2. SỰ PHÁT THẢI HẠT BỤI KHI GIA CÔNG VẬT LIỆU COMPOSITE CFRP BẰNG DỤNG CỤ PCD

Kích thước và hình dạng của phoi được tạo ra trong quá trình gia công vật liệu composite bị ảnh hưởng mạnh bởi các thông số gia công. Đặc biệt đối với vật liệu composite CFRP làm từ vật liệu nền nhiệt rắn, phoi được chia nhỏ thành kích thước nhỏ và lơ lửng trong không khí do tính giòn của cả vật liệu nền và sợi. Do trọng lượng nhẹ hơn, các mảnh vụn ở dạng hạt bụi có thể phát tán vào không khí và người vận hành trong xưởng có thể hít phải. Hít phải những hạt bụi này có thể gây ra một số vấn đề về hô hấp. Đây là một vấn đề có tính cấp thiết, tuy nhiên cho đến nay rất ít nghiên cứu đề cập đến vấn đề này. Đề tài này nhằm mục đích nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số cắt (tốc độ tiến dao và chiều sâu cắt) và độ mòn của dụng cụ trong quá trình cắt CFRP làm bằng vật liệu nền epoxy đến số lượng hạt có hại. Việc định lượng hóa các hạt phân tán được đo bằng máy theo dõi bụi quang phổ laser. Kết quả cho thấy rằng việc tăng tốc độ tiến dao và chiều sâu cắt hướng kính sẽ làm giảm số lượng hạt có hại. Ví dụ: khi lượng chạy dao tăng từ 500 mm/phút lên 1500 mm/phút thì số lượng hạt có hại giảm 37%. Ngoài ra, có thể thấy rằng, khi tăng chiều dài gia công, số lượng hạt có hại sẽ giảm trong tất cả các trường hợp của điều kiện gia công được chọn. Việc giảm số lượng các hạt có hại này là do dụng cụ cắt bị mòn. Dựa trên kết quả nghiên cứu này, có thể khuyến nghị rằng việc gia công bằng sự kết hợp giữa tốc độ tiến dao cao và chiều sâu cắt cao có thể làm giảm sự phân tán số lượng hạt có hại.

2.1. Tổng quan tài liệu nghiên cứu về sự hình thành hạt bụi trong quá trình gia công vật liệu composite CFRP

Vật liệu composite cốt sợi (FRP), một loại vật liệu composite tiên tiến, đã được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực công nghiệp khác nhau (như hàng không vũ trụ) vì tỷ lệ độ bền trên trọng lượng, tỷ lệ độ cứng trên trọng lượng cao và tuổi thọ mỏi dài. Để phù hợp với từng ứng dụng, kết cấu composite thường được chế tạo có hình dạng gần giống với sản phẩm. Tuy nhiên, sau khi tháo khuôn, quá trình gia

công thường được sử dụng để có được kích thước cuối cùng của kết cấu composite. Các quá trình gia công này thường là: phay, tiện và khoan [1-4]. Gia công vật liệu composite đi kèm với một loạt các vết nứt giòn do sự cắt và nứt của vật liệu vật liệu nền dưới tác dụng của lực cắt được tạo ra bởi sự tương tác vật lý giữa dụng cụ cắt và phôi [5-8]. Sự tương tác này là nguyên nhân chính tạo ra các phoi được đặc trưng bởi kích thước nhỏ, có thể có kích thước cỡ micro. Gia công vật liệu composite CFRP không cần chất bôi trơn (gia công khô) thường được các công ty trong công nghiệp khuyến nghị. Tuy nhiên, gia công khô tạo điều kiện cho khuyết tật xuất hiện, tăng tốc độ mài mòn dụng cụ và chủ yếu là phát tán các hạt bụi mịn có kích thước cực nhỏ và cạnh sắc vào không khí [9]. Khuyết tật quan sát được trong quá trình cắt CFRP có thể được tóm tắt là: sự tách lớp, sợi chưa cắt, sự suy giảm nhiệt và/hoặc cơ học của nền, các vết nứt giữa các lớp. Trên thực tế, khi tiến hành gia công khô, việc tạo ra các khuyết tật nêu trên đi kèm với việc phát thải các hạt bụi mịn. Việc sử dụng vật liệu composite ngày càng tăng trong công nghiệp dẫn đến việc tiếp xúc thường xuyên hơn với các hạt bụi mịn. Do đó, các hạt bụi có khả năng gây tổn hại hệ hô hấp và gây ra các kích ứng độc hại. Vì những lý do này, điều quan trọng nhất là phải giảm thiểu các hạt phát ra trong không khí trong quá trình gia công CFRP để bảo vệ người vận hành khỏi các nguy cơ sức khỏe liên quan đến công việc tại xưởng gia công.

Nghiên cứu để hạn chế sự khuếch hạt bụi ra ngoài không khí trong quá trình gia công khô vật liệu composite rất đáng được quan tâm. Tuy nhiên, có rất ít nghiên cứu liên quan đến vấn đề này. Một trong những nghiên cứu sơ bộ về hạt bụi được trình bày bởi Wagman J và cộng sự. [10]. Trong nghiên cứu này, hình dạng của các hạt thu thập được tiến hành khi vật liệu composite than chì/epoxy được gia công bằng hai quá trình, khoan và cưa. Kết quả cho thấy các hạt sinh ra khi khoan có chiều dài chủ yếu từ 50 – 100 μ m, còn các hạt do cưa cắt có chiều dài ngắn hơn. Cả hai trường hợp hạt đều có dạng sợi được nhúng trong vật liệu vật liệu nền và sợi tự do. ES và cộng sự. [11] đã nghiên cứu ảnh hưởng của bản chất của vật liệu composite đến kích thước và số lượng hạt có hại trong sáu mẫu FRP (carbon/epoxy và thủy tinh/epoxy) được gia công. Kết quả cho thấy các hạt có hại tạo ra từ vật liệu

composite sợi thủy tinh có số lượng cao hơn và chiều dài dài hơn so với các hạt tạo ra từ vật liệu composite sợi carbon. Có một điểm đáng lưu ý là các nghiên cứu liên quan đến các hạt bụi tạo ra trong quá trình gia công vật liệu composite không có nghiên cứu nào được thực hiện để chỉ ra sự ảnh hưởng của các thông số gia công đến các hạt có hại.

Haddad và cộng sự. [12] nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số cắt (tốc độ cắt và tốc độ tiến dao) và hình dạng dụng cụ lên các hạt có hại khi cắt các tấm CFRP. Trong nghiên cứu này, ba loại dụng cụ cắt làm bằng carbide vonfram đã được sử dụng, dao phay ngón 4 lưỡi cắt có gờ, dụng cụ có lưỡi được tráng và không tráng. Kết quả thu được cho thấy số lượng hạt có hại giảm khi tăng tốc độ tiến dao và/hoặc giảm tốc độ cắt. Điều đó có nghĩa là nên sử dụng sự kết hợp giữa tốc độ cắt thấp và tốc độ tiến dao cao để tạo ra các hạt có hại tối thiểu. Tuy nhiên, sự kết hợp các thông số gia công này tạo điều kiện cho sự xuất hiện các khuyết tật gia công và chất lượng bề mặt kém [13]. Về ảnh hưởng của hình dạng dụng cụ, số lượng hạt có hại đo được khi sử dụng dao phay ngón 4 lưỡi cắt có gờ lần lượt cao hơn 150% và 120% so với lượng hạt được tạo ra khi tiến hành gia công với dụng cụ có lưỡi dao được phủ và không tráng phủ. Những kết quả này được cho là do thực tế là khi sử dụng dụng cụ có lưỡi dao, nhiệt độ gia công sẽ cao hơn so với trường hợp gia công với dao phay ngón 4 lưỡi cắt có gờ và điều này tạo điều kiện thuận lợi cho sự bám dính của bụi cacbon ở giữa các rãnh dụng cụ của lưỡi dao. dụng cụ. Ngoài ra, trong nghiên cứu của Klocke và cộng sự. [14], kết quả cho thấy rằng, khi cắt hỗn hợp CFRP bằng dụng cụ PCD và carbide, các hạt bụi tạo ra bị ảnh hưởng bởi bản chất của vật liệu dụng cụ cắt. Trên thực tế, các hạt có hại được tạo ra khi sử dụng dụng cụ PCD cao hơn 35% so với trường hợp sử dụng dụng cụ carbide. Sự khác biệt này có thể được giải thích bởi thực tế là, dụng cụ PCD có đặc điểm là bán kính lưỡi cắt nhỏ hơn khi so sánh với bán kính của dụng cụ carbide. Có thể cũng nhận thấy rằng, việc tăng tốc độ cắt dẫn đến sự gia tăng nồng độ khối lượng của các hạt bụi.

Trong phần tiếp theo các phân tích tác động của các thông số cắt (tốc độ cắt, tốc độ tiến dao và chiều sâu cắt), độ mài mòn của dụng cụ (được trình bày đại diện bởi chiều dài gia công) và hình học của dụng cụ cắt đối với số lượng và khối lượng của

các hạt có hại (những hạt có thể bị hít vào phế nang phổi) trong quá trình cắt mẫu CFRP bằng dụng cụ PCD. Số lượng hạt được tạo ra trong quá trình gia công được đo bằng máy theo dõi bụi quang phổ laser GRIMM. Ngoài ra, cấu trúc hình học tế vi của các hạt bụi được quan sát bằng SEM.

2.2. Thiết lập quá trình nghiên cứu thực nghiệm

2.2.1. Các thông số của cấu hình vật liệu composite

Các tấm CFRP được sử dụng trong phần này được làm bằng Prereg đơn hướng do Công ty Hexcel Composite cung cấp với số hiệu vật liệu là HEXLY T700 260 M21 34% (T700/M21). Hai mươi lớp prepregs tương ứng với kích thước 300 mm x 300 mm và độ dày 0,25 mm được xếp chồng lên nhau để tạo ra các tấm có độ dày lý thuyết là 5,2 mm với trình tự xếp chồng như sau: [90°/90°/-45°/0°/45° /90°/-45°/90°/45°/90°]_s. Những tấm này được nén bằng bơm chân không trong môi trường được kiểm soát. Khuôn cho tấm cán mỏng đã được chuẩn bị và đặt trong bao chân không được hút chân không đến 0,7 bar. Quá trình xử lý sau đó được thực hiện ở 180°C trong 120 phút trong đó áp suất được duy trì ở mức 7 bar trong nồi hấp. Các tính chất cơ học của vật liệu composite được trình bày chi tiết trong Bảng 2.1. Sau khi xử lý, các phiến gia công được chuẩn bị bằng quy trình tia nước mài mòn (AWJ) để có được kích thước của mỗi phiến, tức là 280 mm x 14 mm x 5,2 mm hoặc 280 mm x 16 mm x 5,2 mm tùy thuộc vào chiều sâu cắt tương ứng là 2 mm hoặc 3 mm. Kích thước của các phiến được thiết kế đặc biệt để lấy mẫu thử nghiệm nén theo khuyến nghị tiêu chuẩn AFNOR NF T 51-120-3 (1995).

Bảng 2.1. Tính chất cơ học của HexPly T700-M21.

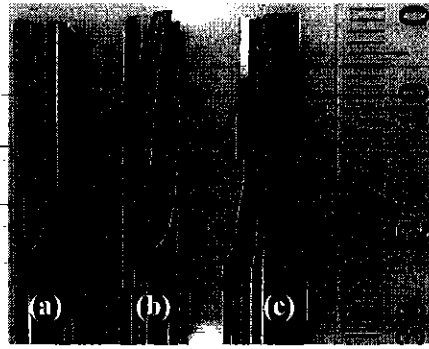
Vật liệu	Độ dày lớp: 0,26 mm
Composite	Tỷ lệ phân trăm sợi: $V_f = 59\%$
(T700/M21)	Trật tự xếp lớp [90°/90°/-45°/0°/45°/90°/-45°/90°/45°/90°] giây Mô đun trẻ: $E_1 = 142$ GPa, $E_t = 8,4$ GPa Mô đun cắt: $G_{12} = G_{13} = 3,8$ GPa, $G_{23} = 3,2$ GPa Nhiệt độ chuyển thủy tinh: $T_g = 187^\circ\text{C}$

2.2.2. Thông số cắt và hình dáng dụng cụ

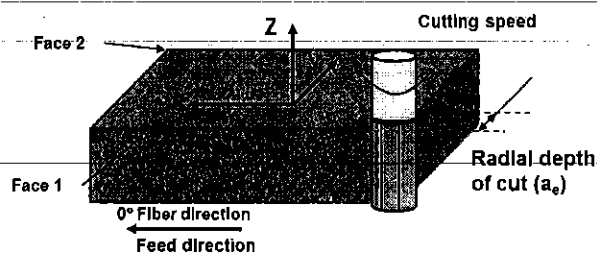
Để nghiên cứu ảnh hưởng của hình dáng dụng cụ lên các hạt có hại, ba loại dụng cụ cắt làm bằng kim cương đa tinh thể (PCD) đã được sử dụng, bao gồm: dao phay ngón bốn me thẳng có răng cưa (4SSF), hai me xoắn (2HF) và hai me thẳng (2SF) (xem Hình 2.1). Đối với các thông số cắt, một ma trận thiết kế đầy đủ bao gồm sự kết hợp của ba cấp độ lượng chạy dao (500 mm/phút, 1000 mm/phút và 1500 mm/phút) và hai cấp độ tốc độ cắt (150 m/phút và 250 m/phút) đã được sử dụng cho tất cả các dụng cụ cắt. Đối với chiều sâu cắt hướng kính lần đầu tiên, thông số này được cố định ở mức 2 mm đối với tất cả các dụng cụ cắt. Trong lần thứ hai và khi tiến hành gia công bằng 2SF, ba mức độ sâu cắt hướng tâm đã được sử dụng (2 mm, 1 mm và 3 mm). Đối với tất cả các điều kiện được kiểm tra, quá trình gia công được tiến hành không có chất bôi trơn (gia công khô). Thông tin chi tiết về các thông số thí nghiệm được trình bày trong Bảng 2.2. Đối với mỗi điều kiện gia công, ba mẫu thử được cắt xén với tổng chiều dài gia công là 168 cm (28 cm \times 2 mặt \times 3 mẫu = 168 cm). Các mặt cắt và hướng cắt tương ứng với hướng 0° của mẫu thử được minh họa bằng sơ đồ trong hình 2.2. Hình dạng cắt được sử dụng được ASAHI và Công ty dụng cụ SECO khuyến nghị để gia công CFRP.

Bảng 2.2. Tóm tắt các điều kiện thí nghiệm được sử dụng để cắt các tấm CFRP.

Dụng cụ cắt	1) Two straight flutes (2SF) + Góc xoắn = 0° , rake angle = 0° , clearance angle = 17° + bán kính = 6 mm + Số lượng lưỡi cắt = 2 2) Two helix flutes (2HF) + Góc xoắn = 0° , góc trước = 5° , góc sau = 7° + bán kính = 6 mm + Số lượng lưỡi cắt = 2 3) Four serrated straight flutes (4SSF) + Góc xoắn = 0° , góc trước = 5° , góc sau = 7° + bán kính = 6 mm + Số lưỡi cắt = 4
Chế độ gia công	Tốc độ cắt (m/min): $V_c = 150$, and 250 Lượng chạy dao (mm/min): $V_f = 500$, 1000 và 1500 Chiều sâu cắt (mm): (a_e) = 2 and 3



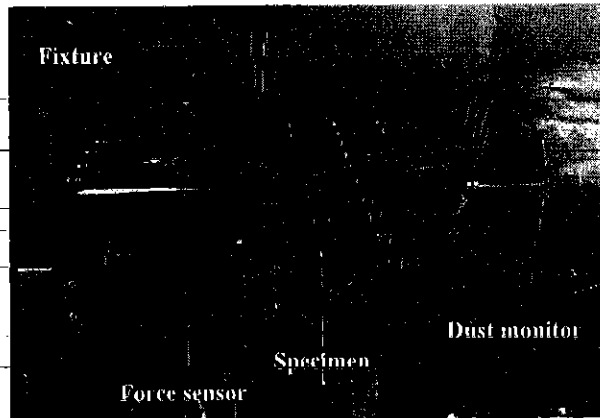
Hình 2.1. Các loại hình dáng hình dáng dụng cụ cắt khác nhau, (a) Dao 4 lưỡi cắt thẳng khía- 4SSF, (b) Dao 2 lưỡi cắt xoắn - 2HF, (c) Dao 2 lưỡi cắt thẳng - 2SF.



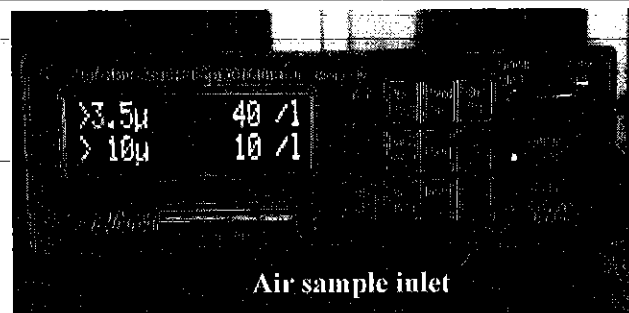
Hình 2.2. Sơ đồ minh họa gia công.

2.2.3. Thiết lập gia công và định lượng số hạt bụi

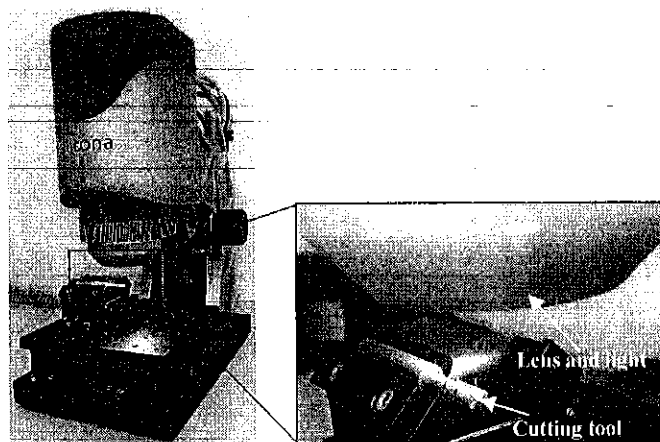
Quá trình gia công được thực hiện bằng trên máy phay CNC 5 trục với nhãn hiệu "DMU 85 mono-BLOCK" có tốc độ trục chính tối đa 18.000 vòng/phút. Các mẫu vật được cố định chắc chắn bằng vít nắp trên một vật cố định cụ thể được thiết kế cho nghiên cứu này (xem Hình 2.3). Để định lượng số lượng và kích thước trung bình của các hạt bụi được tạo ra trong quá trình gia công, một màn hình bụi GRIMM (model 1.109) đã được sử dụng (xem Hình 2.4). Thiết bị này có thể đếm số lượng hạt có kích thước từ 0,25 μm đến 32 μm có trong một lít không khí. Khoảng thời gian cho mỗi phép đo được thiết lập trong 6 giây. Số lượng hạt trung bình được tính toán để có được đại diện cho từng điều kiện gia công. Sau mỗi thử nghiệm gia công, bụi lắng xuống bàn gia công được thu thập để quan sát hình tế vi của các hạt bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM). Để nghiên cứu sự thay đổi hình dáng của lưỡi cắt, một hệ thống kính hiển vi đã được sử dụng (xem Hình 2.5).



Hình 2.3. Thiết bị thí nghiệm để kiểm tra gia công.



Hình 2.4. Màn hình bụi quang phổ laser.

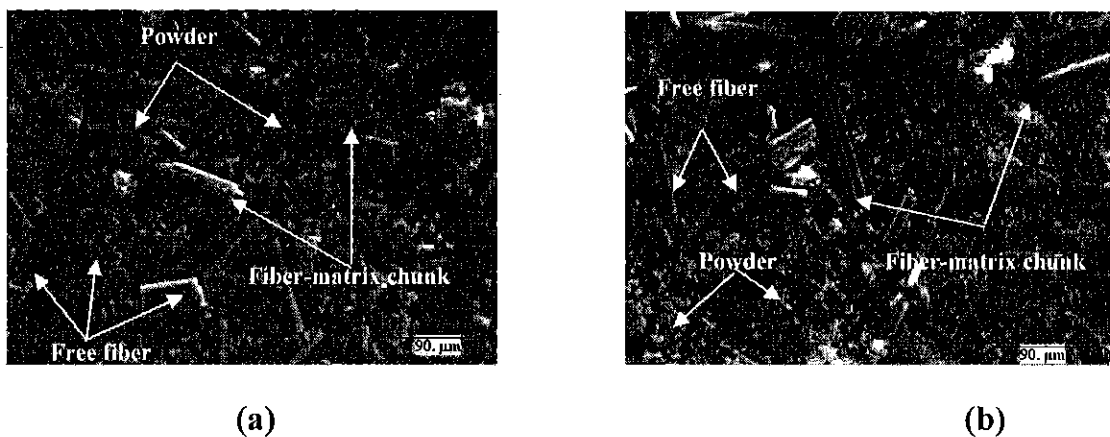


Hình 2.5. Hệ thống kính hiển vi để điều tra các motification của cắt cạnh.

2.3. Phân tích kết quả thực nghiệm

Để phân tích hình thái học của các hạt bụi, các tờ giấy sạch được đặt trên bàn máy để thu thập các hạt lắng. Hình 2.6 cho thấy kính hiển vi điện tử quét (SEM) quan sát các hạt được thu thập cho hai tốc độ chạy dao khác nhau và tốc độ cắt và độ sâu cắt lần lượt là 150 m/phút và 3 mm. Có thể thấy rằng các hạt được tìm thấy có hình dạng không đều và có thể được phân biệt là sợi tự do, bột mịn và các mảnh của khối vật liệu nền sợi. Sự hiện diện của các dạng phoi khác nhau này có thể được

giải thích bởi thực tế là, góc tương đối " θ " giữa hướng của tốc độ cắt và hướng sợi quang gây ra việc tạo ra các dạng phoi khác nhau. Nếu chúng ta đề cập đến nghiên cứu của [5-8] tập trung vào các cơ chế hình thành phoi cho các giá trị khác nhau của góc " θ " trong quá trình cắt trực giao, nó đã được xác định rõ ràng cho " $\theta = 0^\circ$ ", phoi có dạng bột (các hạt nhỏ hơn). Tuy nhiên, đối với " $\theta = 45^\circ$ " and " $\theta = 90^\circ$ ", các phoi có dạng hình dạng liên tục và bị hỏng tương ứng. Những hình dạng điển hình của các hạt được quan sát giống hệt nhau cho tất cả các trường hợp gia công trong nghiên cứu này bất kể điều kiện cắt cũng như chiều dài gia công. Tuy nhiên, có thể nhận ra rằng các hạt được tạo ra bằng cách sử dụng tốc độ chạy dao 1000 mm/phút (xem Hình 2.6b) có nhiều khối hơn các hạt được tạo ra bằng tốc độ chạy dao 500 mm/phút (xem Hình 2.6a). Những điều này có thể được giải thích bởi thực tế là, với tốc độ chạy dao ngày càng tăng, độ dày phoi lý thuyết cũng tăng theo. Điều quan trọng cần đề cập là, đối với bất kỳ điều kiện thử nghiệm nào được sử dụng, một lượng phoi không đáng kể (ở dạng bột) được phân tán trong không khí được coi là bụi gia công. Nhờ màn hình bụi, có thể định lượng số lượng và kích thước của các phoi phân tán này.

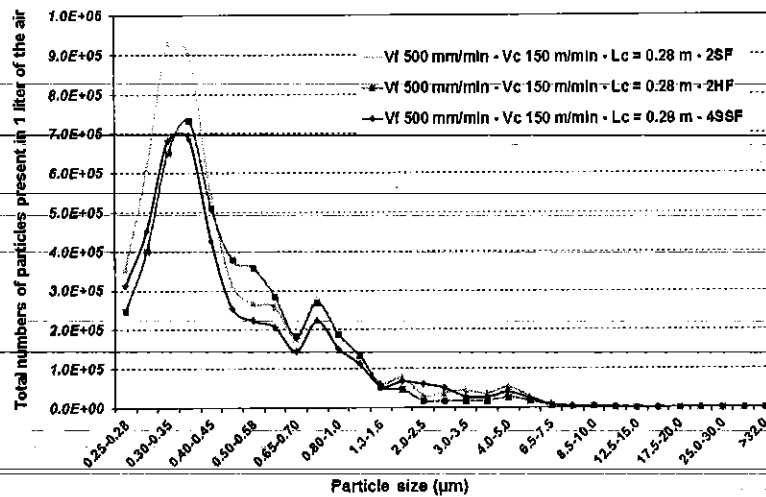


Hình 2.6. Hình ảnh SEM điển hình của các hạt được thu thập ở chiều dài gia công 0,28 m cho tốc độ cắt 150 m/phút và chiều sâu cắt là 3 mm (a) $V_f = 500$ mm/phút, (b) $V_f = 1000$ mm/phút.

2.3.2. Phân tích số hạt bụi có hại tồn tại trong một lít không khí

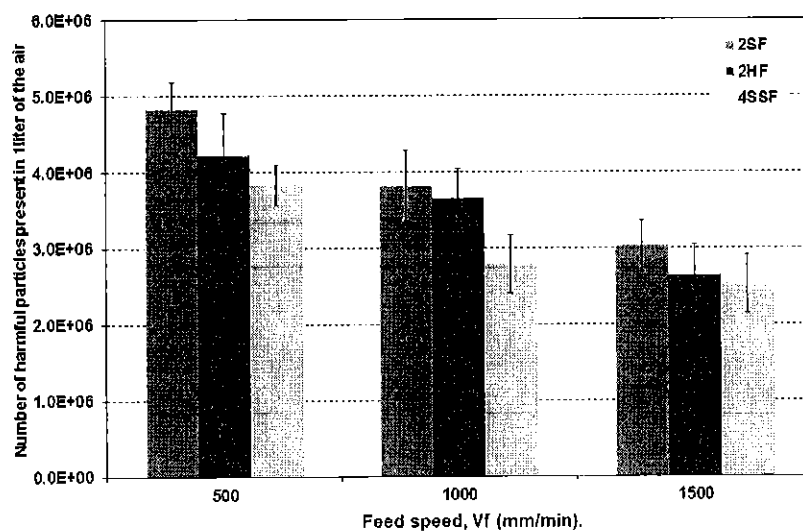
2.3.1. Ảnh hưởng của hình dáng dụng cụ và thông số gia công đến số lượng hạt có hại

Theo tiêu chuẩn tiêu châu Âu EN 481 [15], các hạt bụi được phân biệt theo ba loại là viz.inhalable, thoracic và respirable, trong đó bụi hô hấp là các hạt có thể đến phổi và phế nang và được đặc trưng bởi đường kính khí động học thấp hơn 10 μm . Loại hạt bụi này có thể gây nguy hiểm nghiêm trọng cho sức khỏe của người vận hành. Do đó, việc giảm phân hạt được giải phóng này đóng một vai trò quan trọng trong việc bảo vệ sức khỏe của người vận hành. Do đó, trong nghiên cứu này, chỉ có các hạt hô hấp (hạt có hại) được phân tích. Tuy nhiên, trước hết, hãy xem xét sự đóng góp kích thước của tổng số hạt thực tế được đo bằng cách sử dụng máy theo dõi bụi. Hình 2.7 cho thấy sự phát triển của tổng số hạt được tạo ra bởi ba hình dáng dụng cụ cho chiều sâu cắt 2 mm như một hàm của kích thước hạt. Trong trường hợp này, việc gia công liên quan đến mặt đầu tiên của mẫu thử và được tiến hành với tốc độ chạy dao 500 mm/phút và tốc độ cắt 150 m/phút. Có thể quan sát rõ ràng rằng 2SF tạo ra tổng số hạt nhiều hơn các dụng cụ khác, trong khi 2SF tạo ra tổng số hạt tối thiểu hơn các dụng cụ khác. Dựa trên hình này cho tất cả các hình dáng dụng cụ, Có thể thấy rằng có hai đỉnh rõ ràng nhất cho số hạt bao gồm tỷ lệ phần trăm chính của các hạt đo được. Các đỉnh này tương ứng với kích thước hạt bao gồm 0,3 μm và 0,35 μm cho đỉnh thứ nhất và 0,8 μm đến 1 μm cho đỉnh thứ hai. Cần lưu ý rằng, đỉnh đầu tiên tương ứng với tỷ lệ phần trăm chính của tổng số hạt được đo và đại diện cho nhiều hạt hơn 300% so với số hạt đo được cho đỉnh thứ hai. So sánh với kết quả nghiên cứu của Haddad và cộng sự. [12], phân bố kích thước tổng thể theo cùng một xu hướng, tuy nhiên, tổng số hạt đo được là khác nhau. Sự khác biệt này rõ ràng được quy cho hình dáng dụng cụ. Trên thực tế, với dụng cụ burr được sử dụng bởi Haddad tổng số hạt ít hơn so với tổng số hạt thu được bằng dụng cụ PCD (trong nghiên cứu này). Thật vậy, khi dụng cụ burr được sử dụng, độ bám dính của một lượng bụi carbon không đáng kể ở giữa các dụng cụ đã được quan sát, điều này có thể giải thích tổng số hạt trong không khí thấp hơn.



Hình 2.7. Số lượng hạt có trong 1 lít không khí so với kích thước hạt được tạo ra bởi ba hình dáng dụng cụ.

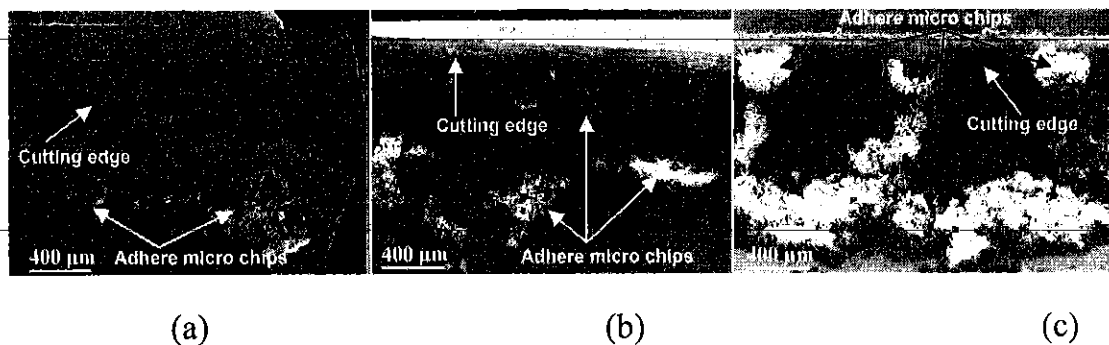
Số lượng hạt có hại được tính từ tổng số hạt theo khuyến nghị của Tiêu chuẩn Châu Âu EN 481 [15]. Sự phát triển của giá trị trung bình của số hạt có hại có trong 1 lít không khí như một hàm của hình dáng dụng cụ và tốc độ chạy dao được thể hiện trong Hình 2.8. Có thể thấy rằng quá trình cắt của dụng cụ 2SF tạo ra các hạt có hại cao nhất khi so sánh với các hình dạng dụng cụ khác, trong khi cắt với dụng cụ 4SSF gây ra các hạt có hại thấp nhất bất kể điều kiện cắt. Trên thực tế, ở điều kiện cắt 500 mm/phút và 150 m/phút, số lượng hạt có hại do dụng cụ 2SF cao hơn so với dụng cụ 2HF và 4SSF lần lượt là 14% và 26%.



Hình 2.8. Sự phát triển của số hạt có hại biến thiên theo hình dáng dụng cụ khi gia công với tốc độ cắt 150 m/phút và chiều sâu cắt là 2 mm.

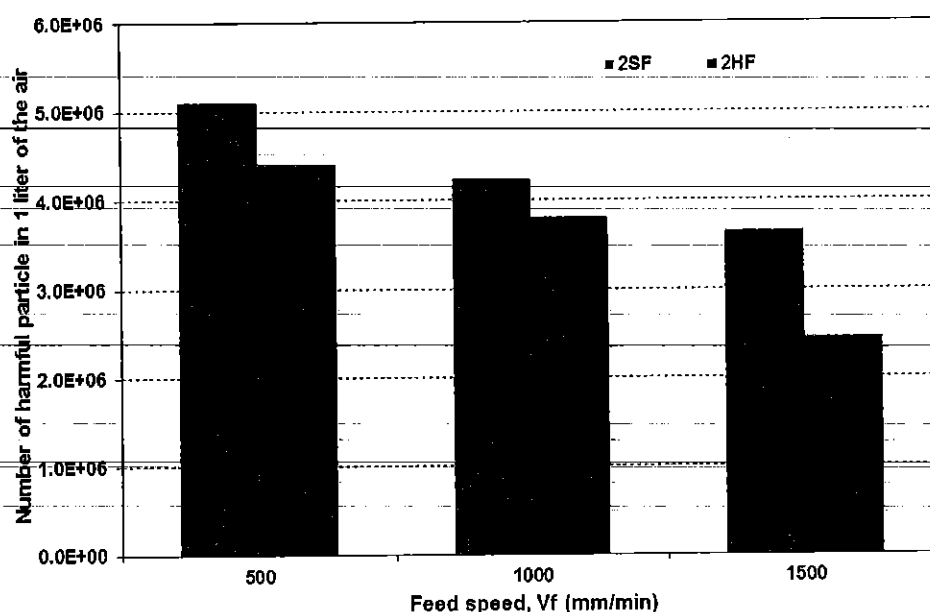
Sự khác biệt về số lượng hạt có hại giữa các hình dạng dụng cụ có thể được giải thích dựa trên sự khác biệt so với hình học tự nhiên của mỗi dụng cụ cắt. Thật vậy, trong Hình 2.9, chúng ta có thể hình dung rõ ràng rằng trong trường hợp 4SSF, có nhiều phoi siêu nhỏ bám vào thành răng cưa dọc theo cạnh cắt và mặt trước (xem hình 2.9.c).

Tuy nhiên, có ít phoi siêu nhỏ bám dính hơn được quan sát thấy trong trường hợp 2HF (xem hình 2.9.b), đặc biệt, có ít phoi siêu nhỏ nhất dính vào cạnh cắt và cào của dụng cụ cắt 2SF (xem hình 9.a). Sự xuất hiện của phoi siêu nhỏ như đã đề cập trước đây có thể ngăn chặn sự phát xạ của các hạt trong quá trình gia công. Vì lý do này, các hạt có hại được tạo ra bằng 4SSF ít hơn so với các hạt khác.



Hình 2.9. Hình ảnh SEM cho thấy các phoi siêu nhỏ bám dính trên rãnh răng cưa và mặt trước cho điều kiện cắt tốc độ cắt 150 m/phút, tốc độ chạy dao 500 mm/phút và độ sâu cắt 2 mm với (a) 2SF, (b) 2HF, (c) 4SSF.

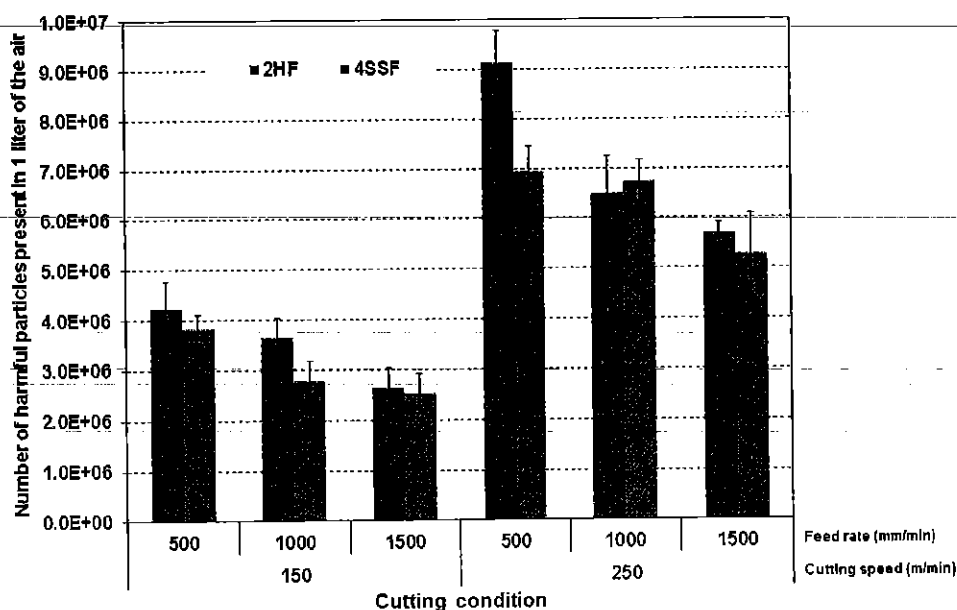
Có thể nhận thấy rằng, một so sánh về sự ảnh hưởng của góc xoắn lên số hạt có hại giữa dụng cụ 2SF và 2HF khi cả hai loại dụng cụ này có chung cấu hình (số lượng me cắt, đường kính, góc trước và góc sau) nhưng khác với góc xoắn. Để loại trừ ảnh hưởng của mài mòn dụng cụ, ảnh hưởng của góc xoắn đến số lượng hạt có hại chỉ được xem xét ở mặt đầu tiên ($L_c = 0,28$ m). Hình 2.10 trình bày sự biến thiên của số lượng hạt có hại dưới dạng tốc độ chạy dao trong trường hợp 150 m/phút và chiều sâu cắt 2 mm của hai hình dáng dụng cụ, 2SF và 2HF. Kết quả trong hình 2.10 cho thấy số lượng hạt có hại được tạo ra trong mặt đầu tiên của dụng cụ cắt 2SF vượt trội so với kết quả từ 2HF, trong tất cả các điều kiện cắt.



Hình 2.10. Ảnh hưởng của góc xoắn đến số lượng hạt có hại ở chiều dài cắt 0,28 m.

Dựa trên kết quả được trình bày trong Hình 2.9, có thể hình dung rằng sự gia tăng tốc độ ăn dao dẫn đến giảm số lượng hạt có hại, không tương ứng với hình dạng dụng cụ. Ví dụ, khi tốc độ ăn dao thay đổi từ 500 mm/phút đến 1500 mm/phút trong trường hợp tốc độ cắt 150 m/phút, số lượng hạt có hại trung bình giảm lần lượt là 37%, 38% và 34% đối với 2SF, 2HF và 4SSF. Ảnh hưởng của tốc độ ăn dao đến số lượng hạt có hại như đã trình bày trước đây có thể được giải thích bởi thực tế là khi gia công với tốc độ chạy dao cao hơn gây ra sự gia tăng độ dày của phoi và khối lượng vật liệu cắt cũng tăng theo. Tuy nhiên, do độ dày phoi cao hơn, xác suất thu được các hạt lắng trên bàn máy với dạng sợi tự do và khối vật liệu nền sợi được đề cập ở trên (xem Hình 2.6) tăng lên. Hơn nữa, khi tăng giá trị của tốc độ cắt (từ 150 m/phút lên 250 m/phút), sự gia tăng số lượng hạt có hại được quan sát thấy đối với tất cả các hình dạng dụng cụ (xem Hình 2.11). Cụ thể là, trong trường hợp dụng cụ cắt 2HF khi sử dụng tốc độ chạy dao 500 mm/phút và tốc độ cắt thay đổi từ 150 m/phút đến 250 m/phút, số lượng hạt có hại tăng 115%. Ảnh hưởng của tốc độ cắt cũng liên quan trực tiếp đến việc giảm độ dày phoi. Thật vậy, khi tốc độ cắt tăng, kết quả là độ dày phoi giảm như được ghi nhận trong tài liệu [13, 16]. Trong giai đoạn này, khối lượng vật liệu cắt của mỗi hành động cắt là nhỏ, do đó chúng ta có được xác suất cao hơn của kích thước phoi nhỏ dễ dàng phát ra trong không khí do

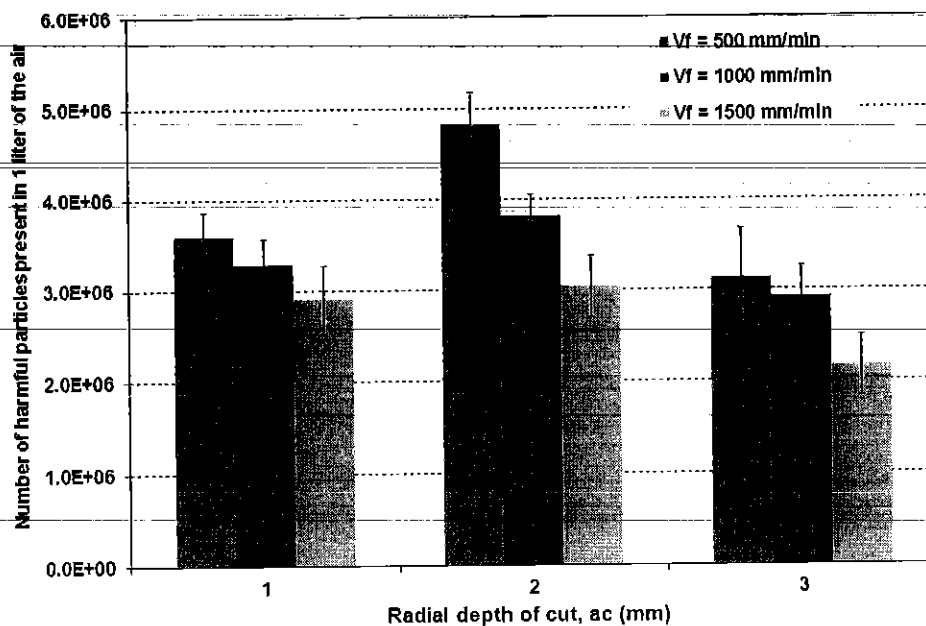
trọng lượng nhẹ. Dựa trên kết quả trên, có thể nói rằng gia công với tốc độ chạy dao cao và tốc độ cắt thấp hơn sẽ tạo ra các hạt có hại tối thiểu, và việc dẫn truyền gia công này có lợi cho người vận hành. Tuy nhiên, nếu so sánh vào các kết quả khoa học liên quan đã công bố, có thể thấy rằng, việc tăng tốc độ chạy dao và giảm tốc độ cắt, tạo ra sự suy giảm chất lượng gia công và làm tăng sự xuất hiện của các sợi chưa cắt (uncut fiber) và sự xuống cấp vật liệu nền (matrix degradation) [13, 16]. Ảnh hưởng của tốc độ cắt và tốc độ ăn dao đến số lượng hạt có hại trong nghiên cứu này tương tự như những gì được trình bày trong công trình nghiên cứu của Haddad và cộng sự. [12]. Tuy nhiên, không có thông tin về độ sâu của hiệu ứng cắt có sẵn trong nghiên cứu của họ, cũng như trong tài liệu khác đã công bố.



Hình 2.11. Sự biến thiên của số lượng hạt có hại như một hàm của tốc độ cắt và tốc độ chạy dao cho 4SSF và 2HF.

Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của chiều sâu cắt được thực hiện bằng cách sử dụng dụng cụ cắt 2SF tại ba mức chiều sâu cắt 1 mm, 2mm và 3 mm đã được áp dụng cho tốc độ cắt chỉ 150 m/phút. Hình 2.12 trình bày sự biến thiên của số lượng các hạt có hại như một hàm của chiều sâu cắt của tốc độ cắt và tốc độ cho ăn. Quan sát thấy rằng ảnh hưởng của chiều sâu cắt của vết cắt có thể được phân biệt bằng hai giai đoạn. Giai đoạn một, khi độ sâu cắt thay đổi từ 1 mm đến 2 mm, số lượng hạt có hại tăng lên cho tất cả các trường hợp tốc độ ăn dao. Cụ thể là, bằng

cách tăng độ sâu cắt này, số lượng hạt có hại tăng 34%, 16% và 5% tương ứng với tốc độ chạy dao là 500 mm/phút, 1000 mm/phút và 1500 mm/phút. Giai đoạn hai, khi độ sâu cắt tăng từ 2 mm lên 3 mm, số lượng hạt có hại giảm. Tỷ lệ phần trăm giảm đối với tốc độ chạy dao là 500 mm/phút, 1000 mm/phút và 1500 mm/phút của số lượng hạt có hại lần lượt là 35%, 24% và 29%.



Hình 2.12. Sự phát triển của số hạt có hại như một hàm của chiều sâu cắt cho tốc độ cắt 150 m/phút của 2SF.

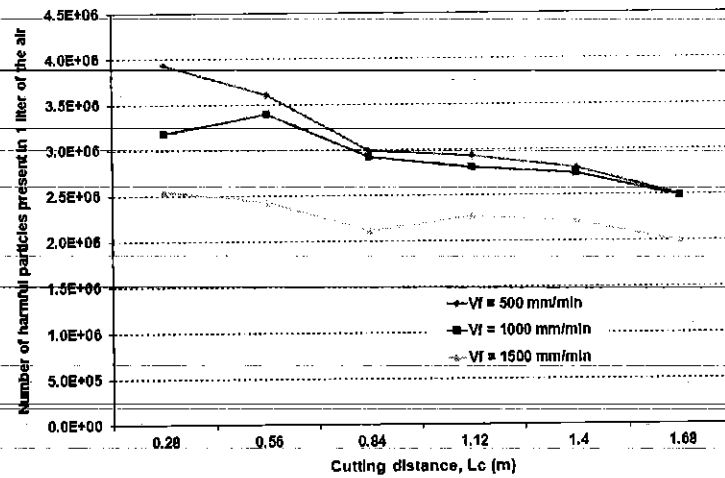
Ảnh hưởng của độ sâu cắt đến số lượng hạt có hại có thể được giải thích rằng khi gia công với độ sâu cắt cao hơn có lợi cho sự gia tăng độ dày của phoi và khối lượng vật liệu cắt cũng tăng theo. Do đó, do độ dày phoi cao hơn, xác suất thu được các hạt lắng trên bàn máy với dạng sợi tự do và khối vật liệu nền sợi được đề cập ở trên (xem Hình 2.6) tăng lên. Điều này giải thích cho sự gia tăng số lượng các hạt có hại trong không khí khi độ sâu cắt thay đổi từ 2 mm đến 3 mm. Tuy nhiên, có thể lưu ý rằng với khối lượng vật liệu cắt cao hơn, nó tương ứng với độ bền cao hơn của các hạt phát ra trong không khí. Thực tế này có thể được giải thích cho sự gia tăng số lượng các hạt có hại với độ sâu cắt ngày càng tăng khi thay đổi từ 1 mm đến 2 mm. Có nghĩa là khối lượng vật liệu cắt trong trường hợp độ sâu cắt 1 mm nhỏ hơn so với trường hợp độ sâu cắt 2 mm. Theo kết quả này, các hạt được tạo ra bằng cách sử dụng độ sâu cắt 2 mm cao hơn.

2.3.3. Ảnh hưởng của hao mòn dụng cụ đến số lượng hạt có hại

Từ Hình 2.8, 2.11 và 2.12 có thể quan sát thấy độ lệch chuẩn đáng kể của các giá trị trung bình. Điều quan trọng cần lưu ý là độ lệch chuẩn này được tính từ sáu lần đo khác nhau trên sáu mặt gia công với việc gia công từng mặt của ba mẫu được thử nghiệm cho từng điều kiện bằng cùng một dụng cụ. Do đó, các giá trị đáng kể của độ lệch chuẩn có thể liên quan đến ảnh hưởng của sự mài mòn của lưỡi cắt. Cho rằng, tốc độ hao mòn của dụng cụ bị ảnh hưởng mạnh mẽ bởi các thông số gia công, đặc biệt là tốc độ chạy dao, đây là một trong những lý do chính về sự thay đổi của các giá trị độ lệch chuẩn.

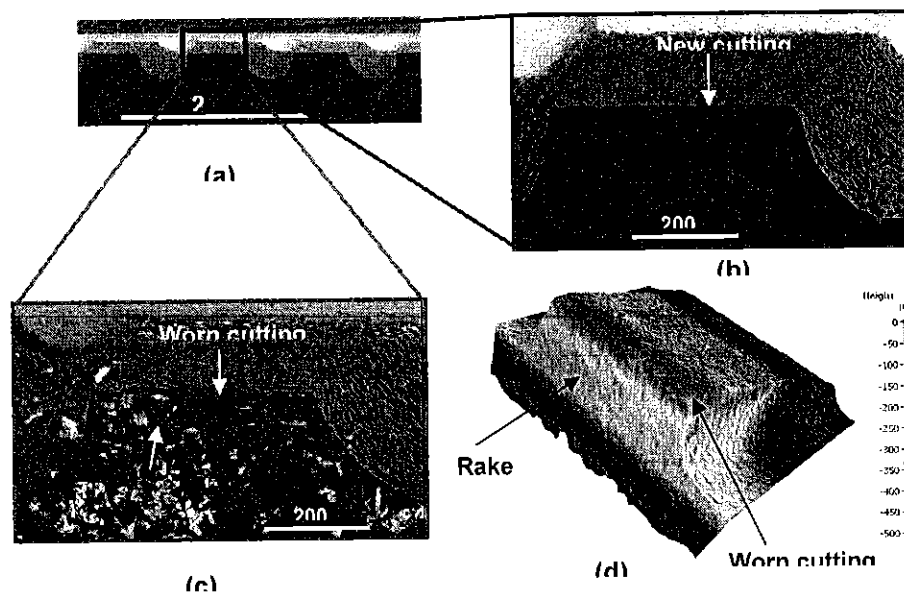
Để hiểu rõ hơn về tác động của mài mòn dụng cụ về chiều dài gia công đối với các hạt có hại đối với tất cả các điều kiện được thử nghiệm được phân tích, Hình 2.13 minh họa sự biến thiên của số lượng hạt có hại trong trường hợp dụng cụ cắt 2SF và điều kiện cắt tốc độ cắt 150 m/phút và độ sâu cắt 2 mm như một hàm của chiều dài gia công. Mỗi điểm được trình bày trong trục ngang được biểu thị cho giá trị của chiều dài gia công sau khi gia công mỗi mặt trong tổng số sáu mặt cho mỗi điều kiện cắt. Có thể thấy rằng số lượng các hạt có hại đo được giảm khi tăng chiều dài gia công. Ví dụ, khi gia công được tiến hành với tốc độ chạy dao 500 mm/phút và chiều sâu cắt là 3 mm, số hạt có hại giảm 13% khi chiều dài gia công thay đổi từ 0,28 m (mặt đầu tiên của phôi đầu tiên) đến 1,68 m (mặt cuối cùng của phôi thứ ba). Việc giảm số lượng các hạt có hại với chiều dài gia công ngày càng tăng được quan sát thấy đối với tất cả các điều kiện cắt bất kể hình dạng dụng cụ trong nghiên cứu này.

Trên thực tế, với sự gia tăng chiều dài gia công, bán kính của lưỡi cắt tăng lên như trình bày trong hình 2.14 và 2.15. Trong trường hợp này, giá trị của bán kính lưỡi cắt trở nên quan trọng hơn so với đường kính của sợi carbon ($\approx 7\mu\text{m}$), điều này có lợi cho việc tăng lực cắt. Do đó, các cơ chế hình thành phoi là do sự đứt gãy gây ra bởi sự kết hợp giữa uốn cong và vênh cục bộ không giống như các cơ chế cắt cho dụng cụ mới (với bán kính cạnh cắt $\approx 3\mu\text{m}$). Đối với giá trị cao hơn của bán kính cắt cạnh, xác suất thu được phoi ở dạng sợi tự do và khối vật liệu nền sợi là nổi bật hơn. Cuối cùng, các phoi cứng hơn được tạo ra tương ứng với kích thước lớn hơn của các hạt do trọng lượng nặng hơn nhanh chóng giảm trên bề mặt gia công.



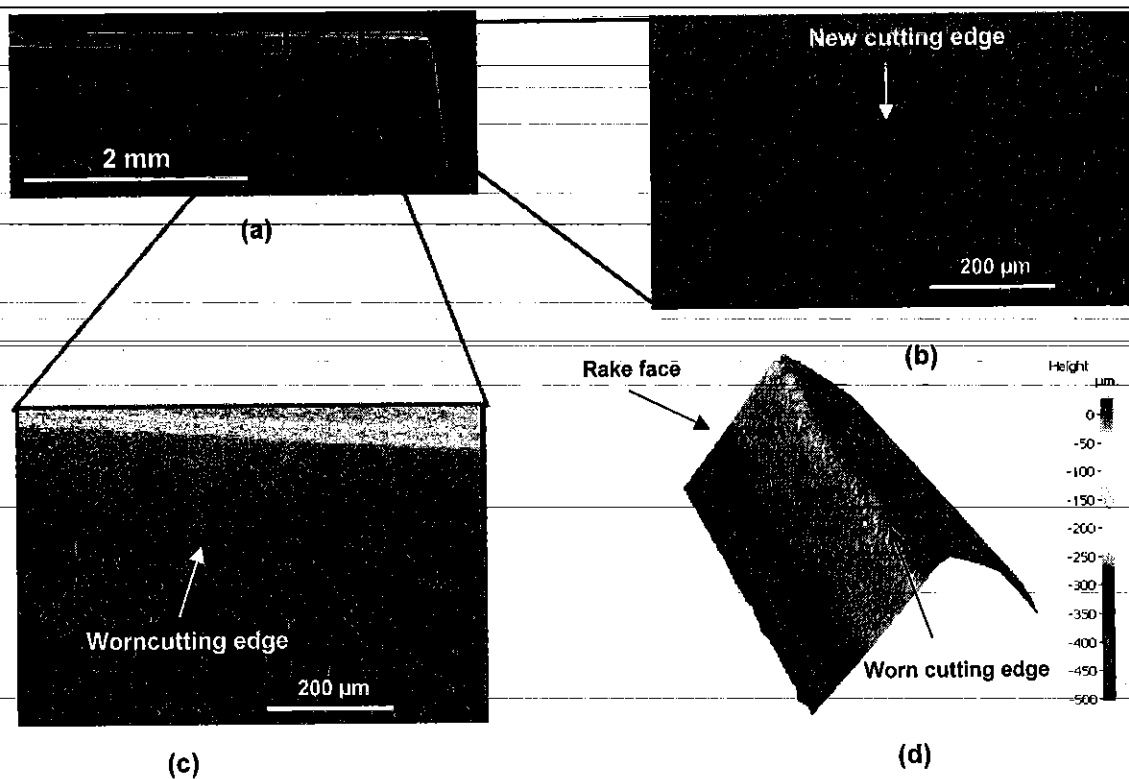
Hình 2.13. Sự biến thiên của các số hạt có hại được tạo ra bằng cách sử dụng 2SF như một hàm của chiều dài gia công cho chiều sâu cắt 3 mm và tốc độ cắt 150 m/ph

Từ phân tích các hạt có hại này, có thể nói rằng số lượng hạt có hại có thể được giảm thiểu nếu quá trình gia công được tiến hành ở tốc độ ăn dao cao hơn và độ sâu cắt cao hơn. Tuy nhiên, như đã đề cập trước đó, sự kết hợp này có thể tạo ra bề mặt gia công thô hơn cũng được ghi nhận trong [13, 16]. Cuối cùng, để tối ưu hóa các thông số gia công trong quy trình thông thường, sẽ là điều cơ bản để đạt được sự cân bằng giữa chất lượng gia công và số lượng hạt có hại được giải phóng. Đây là một nội dung quan trọng sẽ được trình bày trong Chương 3 của nghiên cứu này.



Hình 2.14. Hình ảnh SEM của các cạnh cắt của dụng cụ cắt 4SSF (a) dụng cụ mới, (b) hình phóng đại của dụng cụ mới, (c) hình phóng đại của lưỡi cắt cho tốc độ cắt

150 m/phút và tốc độ chạy dao 500 mm/phút tại chiều dài gia công 1,68 m, (d) Topography sau khi gia công sau chiều dài gia công 1,68 m.



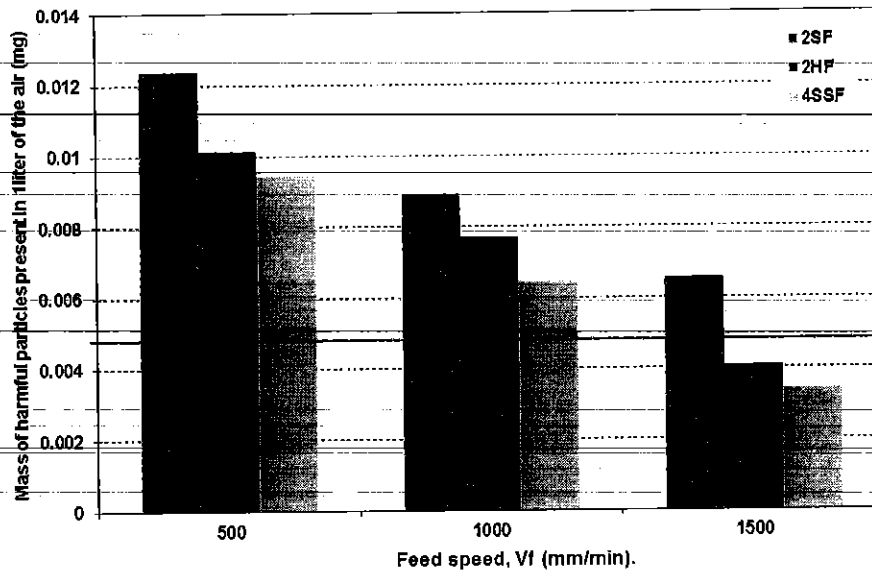
Hình 2.15. Hình ảnh SEM của các cạnh cắt của dụng cụ cắt 2HF (a) dụng cụ mới, (b) chế độ xem phóng đại của dụng cụ không sử dụng, (c) chế độ xem phóng đại của lưỡi cắt cho tốc độ cắt 150 m/phút và tốc độ chạy dao 500 mm/phút sau chiều dài gia công 1,68 m, (d) Topography sau khi gia công sau chiều dài gia công 1,68 m.

Có thể thấy rằng số lượng các hạt có hại có trong 1 lít không khí ước tính sử dụng màn hình bụi đóng một vai trò quan trọng trong việc kiểm soát sự an toàn cho người vận hành trong gia công vật liệu composite. Tuy nhiên, mặc dù số lượng các hạt có hại là rất lớn, kích thước của chúng rất nhỏ. Do đó, không đủ để điều tra hoàn toàn ảnh hưởng của bụi gây ra đối với sức khỏe của người vận hành. Cần ước tính khối lượng của các hạt có hại có trong 1 lít không khí hoặc nồng độ khối lượng.

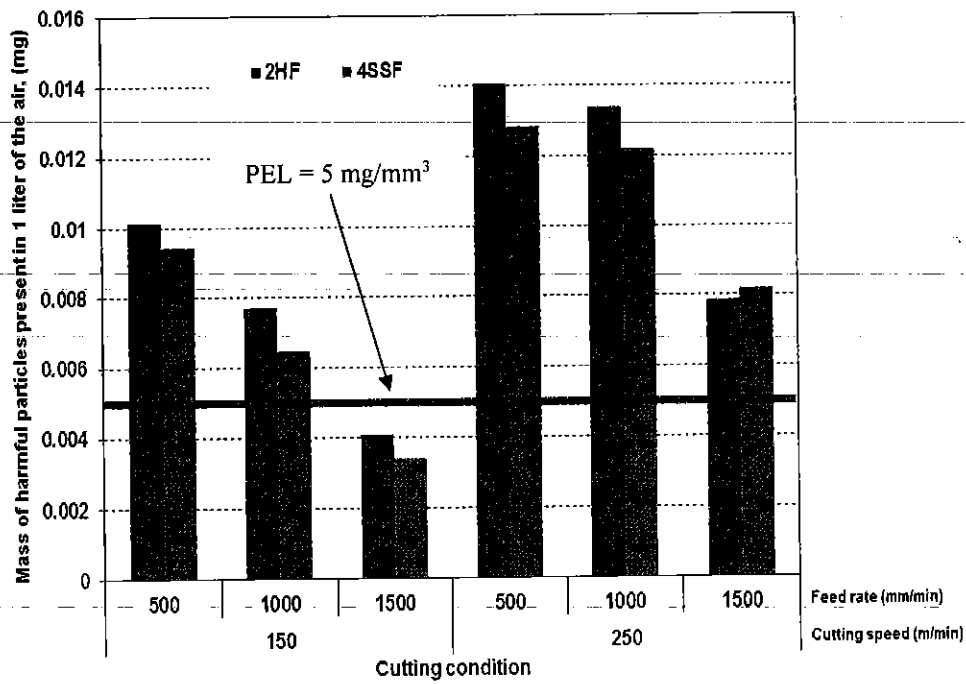
3.3. Phân tích khối lượng của các hạt có hại

Để tính khối lượng của các hạt có hại được thực hiện, khối lượng hạt được chọn làm hình dạng cầu. Cách thức tính toán khối lượng tương tự như chi tiết trong công trình nghiên cứu của Haddad và cộng sự. [12]. Hình 2.16, Hình 2.17 và Hình 2.18 trình bày sự biến thiên của khối lượng hạt có hại với các thông số cắt và hình dạng dụng cụ khác nhau. Điều đáng chú ý ở đây chính là sự gia tăng tốc độ cắt và

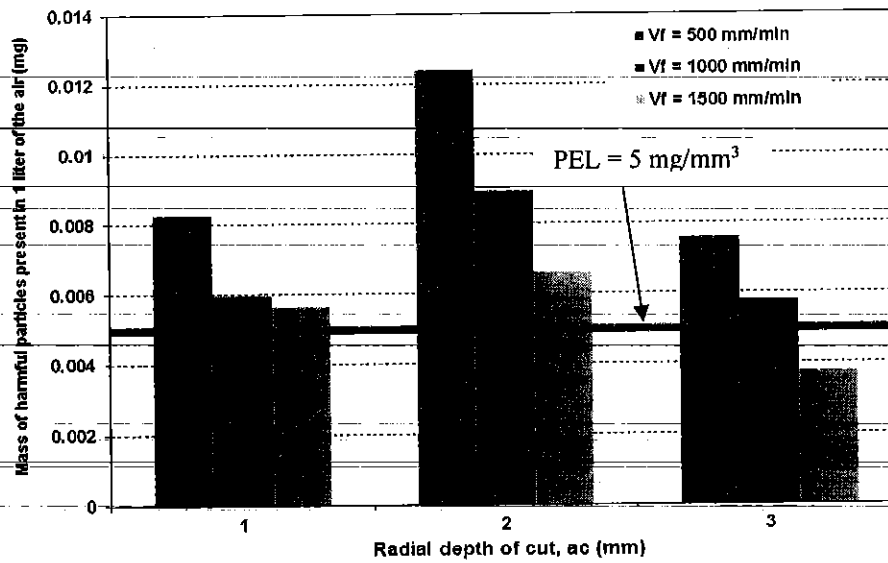
giảm tốc độ ăn dao dẫn đến tăng khối lượng của các hạt có hại. Hơn nữa, khối lượng các hạt có hại được tạo ra bởi dụng cụ cắt 2SF là cao nhất, và theo sau đó là kết quả từ dụng cụ cắt 2HF và dụng cụ cắt 4SSF tạo ra khối lượng hạt có hại thấp nhất. Dựa trên những kết quả này, Có thể nhận thức được rằng những xu hướng khối lượng này tương tự như xu hướng của số hạt có hại khi chúng được coi là một hàm của các tham số cắt và hình dáng dụng cụ (xem hình 2.10 và 2.11). Theo OSHA [18], để bảo vệ người vận hành khỏi các hạt lơ lửng, bụi respirable được tạo ra trong quá trình gia công không thể thực hiện giới hạn phơi nhiễm cho phép (PEL) là 5 mg/m^3 đối với khối lượng có hại trong 8 giờ. Vì lý do này, có thể thấy rằng gia công với điều chỉnh cắt tốc độ cắt 150 m/phút và tốc độ chạy dao 1500 mm/phút kết hợp với độ sâu cắt 2 mm cho dụng cụ cắt 2HF và 4SSF và kết hợp với độ sâu cắt 3 mm cho dụng cụ cắt 2SF sẽ tạo ra khối lượng các hạt có hại dưới giá trị của PEL. Các điều kiện cắt còn lại và hình dạng dụng cụ gây ra các giá trị khối lượng có hại vượt quá giá trị của PEL (xem hình 2.16 và 2.17). Trong trường hợp này, các thiết bị bảo hộ lao động như găng tay, khẩu trang và áo khoác phòng thí nghiệm rất được khuyến khích sử dụng.



Hình 2.16. Khối lượng các hạt có hại ở tốc độ cắt 150 m/phút đối với các hình dạng dụng cụ khác nhau.

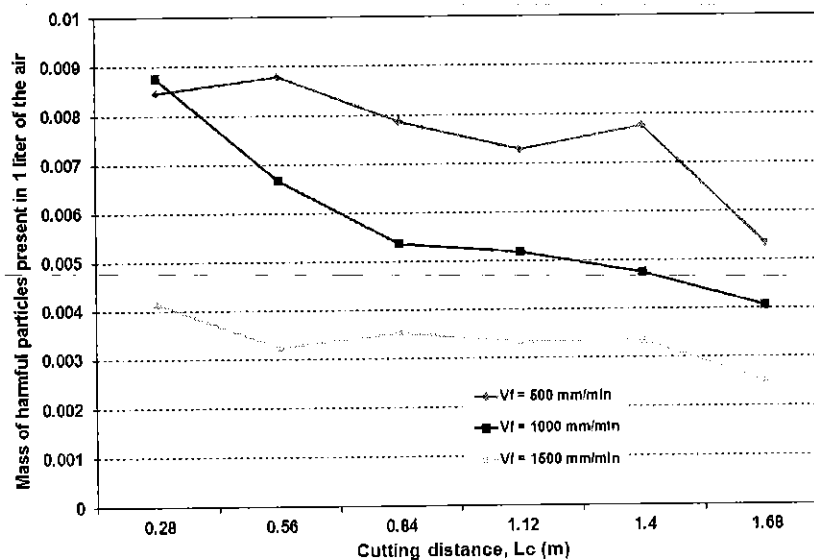


Hình 2.17. Sự phát triển của khối lượng hạt có hại như một chức năng của tốc độ cắt và tốc độ chạy dao cho 4SSF và 2HF.



Hình 2.18. Sự phát triển của khối lượng hạt có hại như một hàm của chiều sâu cắt cho tốc độ cắt 150 m/phút của 2SF.

Liên quan đến ảnh hưởng của chiều dài gia công đến khối lượng của các hạt có hại, có thể thấy rằng khối lượng của các hạt có hại giảm khi tăng chiều dài gia công, và xu hướng này tương tự như số hạt có hại. Cụ thể là, trong trường hợp dụng cụ cắt 2SF và tốc độ cắt 150 m/phút, tốc độ chạy dao 500 mm/phút và độ sâu cắt 3 mm, khối lượng của các hạt có hại giảm 37% khi chiều dài gia công tăng từ 0,28 m lên 1,68 m.



Hình 2.19. Sự phát triển của khối lượng hạt có hại được tạo ra bằng cách sử dụng 2SF như một hàm của chiều dài gia công cho độ sâu cắt 3 mm và tốc độ cắt 150 m/phút.

Tài liệu tham khảo chương 2

- [1] Zitoune, R. và cộng sự. Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminium sandwich. *Compos. Part B Eng.* (2012). doi:10.1016/j.compositesb.2011.08.054
- [2] Hejjaji, A., Singh, D., Kubher, S., Kalyanasundaram, D. & Gururaja, S. Machining damage in FRPs: Laser versus conventional drilling. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* (2016). doi:10.1016/j.compositesa.2015.11.036
- [3] Cadorin, N., Zitoune, R., Seitier, P. & Collombet, F. Analysis of damage mechanism and tool wear while drilling of 3D woven composite materials using internal and external cutting fluid. *J. Compos. Mater.* (2014). doi:10.1177/0021998314553045
- [4] Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F. & Castanié, B. Machinability and surface quality during high speed trimming of multi-directional CFRP. *Int. J. Mach. Mach. Mater.* (2013). doi:10.1504/IJMMM.2013.053229
- [5] Wang DH, Ramulu M and Arola D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: Unidirectional laminate. *Tools & Manufacture*.1995; Vol. 35, No, 12, pp 1623-1638.
- [6] Zitoune R, Collombet F, Lachaud F, Piquet R, Pasquet P. Experiment-calculation comparison of the cutting condition representative of the long fiber composite drilling phase. *Composites Science and Technology*. 2005; 65(3/4):455-66.
- [7] Koplev, A., Lystrup, A. & Vorm, T. The cutting process, phois, and cutting forces in machining CFRP. *Composites* (1983). doi:10.1016/0010-4361(83)90157-X
- [8] Wang, D. H., Ramulu, M. & Arola, D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* (1995). doi:10.1016/0890-6955(95)00014-0
- [9] M. Ramulu and J. Kramlich., "Machining Of Fiber Reinforced Composites: Review Of Environmental And Health Effects" *International journal of Environmentally Conscious Manufacturing*, Vol. 11, No.4, 2004, pp. 1-19
- [10] Wagman J, Berger HR, Miller JL, Conner WD. Dust and residues from machining and incinerating graphite/epoxy composites: A preliminary study. *Environmental Technology Letters*. 1982; 03, 469-478
- [11] Boatman ES, Covert D, Kalman D, Luchtel D, and Omenn GS. Physical, Morphological, and Chemical studies dusts derived from the machining of composite-epoxy materials. *Environmental research*. 1988; 45, 242-255.
- [12] Haddad M, Zitoune R, Eyma F, Castanié B. Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range. *Composites - Part A*. 2014; 66, 142-154. Vol. 60, No. 1, pp.107-113.
- [13] Ahmad JS. *Machining of polymer composites*. Springer; 2009. ISBN 9780-387-35539-9.
- [14] Klocke, F., C. Koenig, C. Wuertz, and C. Dietz. *Environmental Effects and Safety in Machining Fibrous Composites. Machining of Ceramics and Composites*. Edited by S. Jahanmir, M. Ramulu, and P. Koshy, Marcel Dekker, Inc., New York (1999), pp. 411-425.

[15] European Standard Norm EN 481. Workplace atmospheres – size fraction definitions for measurement of airborne particles. Brussels: European Committee for Standardization; 1993.

[16] Ahmad JS, Urban N, and Cheraghi H. Machining Damage in Edge Trimming of CFRP. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012; 27: 802-808.

[17] Nguyen-Dinh N, Zitoune R, Bouvet C, LEROUX S. Experimental study of dust emission during trimming of CFRP structures with PCD tool. *European Conference on Composite Materials (ECCM18)*, Athens, June 2018.

[18] Code du travail – Article R4222-10. Occupational exposure limits. Created by décret n02008-244; March 7th 2008 – art. (V).

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ VÀ MÒN DỤNG CỤ CẮT LÊN SỰ HÌNH THÀNH KHUYẾT TẬT TRONG GIA CÔNG VẬT LIỆU COMPOSITE LỚP

3.1. Các nghiên cứu liên quan

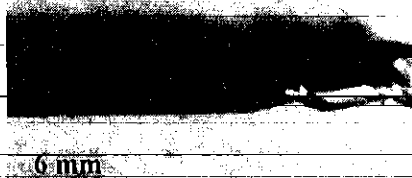
Trong những thập kỷ gần đây, vật liệu composite CFRP đã được chấp nhận rộng rãi trong một số ngành công nghiệp quan trọng như ô tô, vận chuyển, máy bay, thiết bị thể thao. Điều này là do những ưu điểm của CFRP so với vật liệu truyền thống như ổn định kích thước, độ bền riêng cao và mật độ thấp. Để phù hợp với từng ứng dụng nhất định, các bộ phận composite thường được chế tạo thành hình dạng gần với sản phẩm [1]. Để loại bỏ các vật liệu dư thừa ở cạnh của các bộ phận CFRP đúc, các quá trình gia công thường được sử dụng để có được kích thước cần thiết cho các quá trình lắp ráp. Các quy trình này bao gồm phay, khoan, tiện [2-4]. Có một thực tế là quá trình gia công vật liệu composite CFRP thường liên quan đến sự xuất hiện của các khuyết tật gia công trên bề mặt gia công [5, 6]. Những loại khuyết tật này như nứt vật liệu nền, bong tách bề mặt kết nối sợi và vật liệu nền, suy thoái vật liệu nền, kéo sợi [7-9]. Các khuyết tật gia công gây ra có thể ảnh hưởng có hại đến tính toàn vẹn bề mặt gia công và các tính chất cơ học của kết cấu CFRP trong quá trình làm việc [5, 10]. Vì lý do này, cần phải biết rõ và lựa chọn phù hợp các yếu tố ảnh hưởng đến việc tạo ra các khuyết tật. Khuyết tật gia công đã được xác nhận là phụ thuộc vào một số yếu tố như thông số gia công, hình dạng dụng cụ và hiện tượng mài mòn của dụng cụ cắt [11-13]. Như đã biết, sự kết hợp giữa giá trị cao của tốc độ cắt và tốc độ chạy dao thấp tạo ra chất lượng bề mặt gia công tốt hơn khi gia công vật liệu composite [14]. Các tác giả được đề cập tiết lộ rằng gia công với tốc độ cắt cao hơn và tốc độ chạy dao thấp hơn có thể tạo ra độ dày phoi lý thuyết hoặc khối lượng vật liệu cắt nhỏ hơn, do đó quá trình gia công dễ dàng thực hiện. Kết quả là, chất lượng gia công tốt hơn thu được. Các kết quả tương tự cũng đã được quan sát thấy trong các nghiên cứu của các nhà nghiên cứu khác [15, 16]. Tuy nhiên, Nguyễn Đình Ngọc và cộng sự [17] chỉ ra rằng nếu gia công ở tốc độ

chạy dao thấp và tốc độ cắt cao, ảnh hưởng của mài mòn dụng cụ quan trọng hơn so với các thông số gia công. Do đó, các bề mặt gia công thể hiện một mức độ nghiêm trọng của các khuyết tật gây ra được tạo ra. Phát hiện này được ghi nhận tương tự trong nghiên cứu của Haddad và cộng sự.[18]. Trong gia công cán CFRP, do độ dẫn nhiệt thấp của thành phần vật liệu nền và tính chất mài mòn cao của sợi carbon, các khu vực tiếp xúc xảy ra hiện tượng ma sát làm cho lưỡi cắt nhanh chóng bị mòn. Đánh giá độ mòn của dụng cụ có thể được thực hiện bằng cách mài mòn sườn [19-21] và bán kính cắt cạnh [22] hoặc theo chiều dài gia công [23]. Hầu hết các nghiên cứu trong tài liệu đã kết luận rằng tốc độ cắt và tốc độ chạy dao có ảnh hưởng mạnh mẽ đến việc tạo ra độ mòn sườn [21, 24]. Elgnemi và cộng sự. [25] trình bày chi tiết rằng việc tăng tốc độ cắt hoặc tăng tốc độ chạy dao dẫn đến tăng độ mòn trung bình của dụng cụ. Hơn nữa, tốc độ ăn dao có tác động nhiều hơn đến độ mòn của dụng cụ so với tốc độ cắt. Kết quả này phù hợp với những gì được ghi nhận bởi [26]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu [27], các tác giả đã chỉ ra rằng tốc độ cắt có tác động mạnh hơn đến độ mòn của dụng cụ so với tốc độ cắt vì tốc độ cắt là yếu tố chính ảnh hưởng đến nhiệt độ cắt. Rõ ràng là đã có những kết quả mâu thuẫn về khả năng gia công của vật liệu composite được đưa ra bởi các nhà nghiên cứu. Mặc dù gần đây đã có nhiều nghiên cứu liên quan đến gia công composite, nhưng nó vẫn là một nhiệm vụ đầy thách thức cần nghiên cứu thêm. Điều này là do thực tế trong quá trình gia công CFRP, ứng xử của vật liệu chủ yếu không chỉ phụ thuộc vào tính không đồng nhất và dị hướng mà còn phụ thuộc vào các tính chất vật liệu gia cường và vật liệu nền đa dạng. Phản ứng giữa các dụng cụ cắt và các vật liệu phối khác nhau có thể hoàn toàn khác nhau. Do đó, kết quả trong một nghiên cứu thực nghiệm cụ thể không phải lúc nào cũng có thể áp dụng đầy đủ cho các kết quả của một nghiên cứu cụ thể khác. Để trả lời cho những khoảng trống chứa đựng sự mơ hồ trong nghiên cứu composite gia công như phân tích trên, tác động của các thông số gia công và mài mòn dụng cụ đến chất lượng gia công khi thực hiện phay cạnh hoặc cắt vật liệu composite CFRP sẽ được nghiên cứu thực nghiệm trong chương này. Độ nhám bề mặt trung bình được chọn để mô tả chất lượng gia công. Sáu dụng cụ cắt Carbide mới với ba lưỡi cắt xoắn được sử dụng để thử nghiệm. Một thiết kế thử

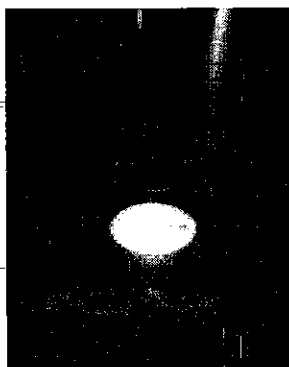
thử nghiệm đầy đủ cho thấy sự kết hợp giữa ba mức tốc độ chạy dao và hai mức tốc độ trục chính được sử dụng để điều tra tác động của các thông số gia công đến chất lượng gia công. Ảnh hưởng của mài mòn dụng cụ đến chất lượng gia công sẽ được tiến hành dựa trên sự phát triển của chiều dài gia công.

3.2. Quy trình xây dựng thí nghiệm gia công phay

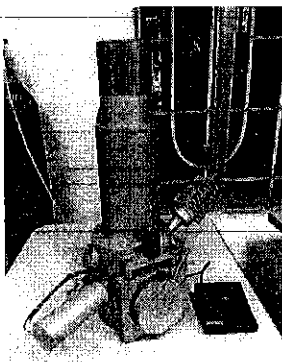
Vật liệu sử dụng trong thí nghiệm này tương tự như đã trình bày trong phần 2.2 của báo cáo này. Trước khi thử nghiệm phay, mỗi tấm được cắt theo kích thước 300 mm x 150 mm x 5,2 mm trong đó hướng cắt dọc theo chiều dài 150 mm. Chi tiết thông tin của CFRP có thể được tham khảo trong Bảng 2.1. Sáu điều kiện cắt là kết quả của việc kết hợp ba giá trị tốc độ chạy dao Vf, (500 mm/phút, 1000 mm/phút, 1500 mm/phút) và hai giá trị tốc độ trục chính N, (8000 vòng/phút và 10000 vòng/phút). Tất cả các thử nghiệm gia công được kiểm tra mà không cần chất làm mát hoặc gia công khô trong nghiên cứu này. Bề mặt gia công sẽ không cố định và được đánh giá định lượng bằng cách đo độ nhám bề mặt, Rz trong đó các giá trị trung bình của độ nhám bề mặt được tính bằng ba phép đo. Sáu dụng cụ Carbide mới với ba me cắt xoắn và đường kính 6 mm được chọn để thử nghiệm phay cạnh (Hình 2.1). Góc xoắn, góc cào và góc giải phóng mặt bằng lần lượt là 45°, 11° và 9°. Đối với mỗi điều kiện cắt, chiều dài gia công 3,0 m hoặc 3000 mm sẽ được thực hiện trong đó hướng cấp liệu song song với kích thước 150 mm của tấm CFRP. Điều này tương ứng với hai mươi đường chạy dao của quá trình phay cạnh (20 x 150 mm = 3000 mm). Một trung tâm thẳng đứng Mazak thông minh 530C (Tập đoàn Yamazaki Mazak, Nhật Bản) được sử dụng để thực hiện các thử nghiệm phay cạnh. Chất lượng gia công được đặc trưng bởi máy kiểm tra độ nhám của SJ-210 Mitutoyo (Tập đoàn Mitutoyo, Nhật Bản) với chiều dài cắt 0,8 mm và chiều dài ngang là 5,0 mm. Hình ảnh quang học của dụng cụ cắt được chụp bằng cách sử dụng Kính hiển vi kỹ thuật số KEYENCE VHX-6000 để nêu hiện tượng hao mòn dụng cụ (Hình 3.2). Để định lượng trạng thái khuyết tật gia công gây ra, cấu trúc vi mô của bề mặt gia công được nghiên cứu bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) được tham chiếu trong "JEOL-JSM 5410 LV" (Hình 3.3).



Hình 3.1. Dụng cụ cắt phay Carbide với ba cạnh cắt xoắn.



Hình 3.2. Kính hiển vi kỹ thuật số Keyence VHX-6000



Hình 3.3. Máy SEM được tham chiếu theo JEOL-JSM 5410 LV

3.3. Kết quả nghiên cứu

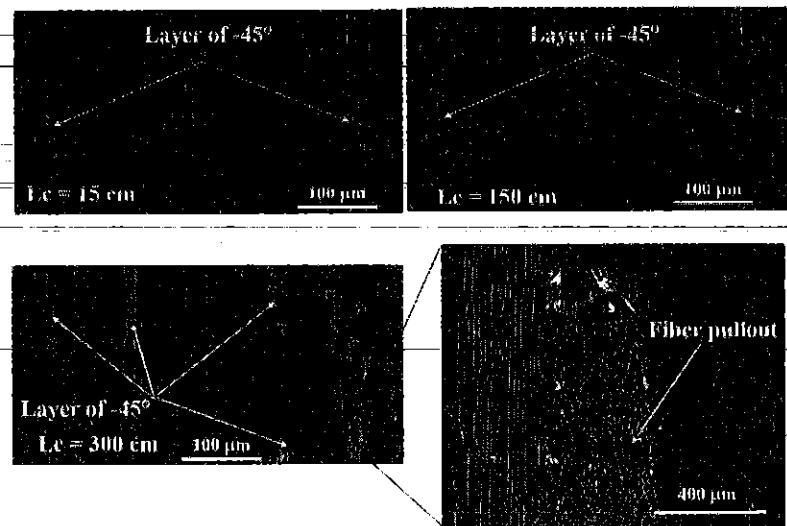
3.3.1. Phân tích các khuyết tật cảm ứng quan sát thấy trong bề mặt gia công

Sau khi gia công, các cấu trúc vi mô của bề mặt gia công được điều tra bằng cách sử dụng quan sát SEM. Đối với mỗi điều kiện cắt, ba vị trí có chiều dài gia công (L_c) được xem xét, ví dụ: $L_c = 15$ cm, 150 cm và 300 cm. Hình 3.4 trình bày hình ảnh SEM tương ứng với điều kiện cắt tốc độ trục chính là 8000 vòng/phút và tốc độ chạy dao là 500 mm/phút. Có thể quan sát thấy rằng không có sự khác biệt đáng kể về mức độ khuyết tật gia công giữa các mức ở chiều dài gia công từ 15 cm đến 150 cm trong đó các mức độ khuyết tật gia công nhỏ được hình dung theo

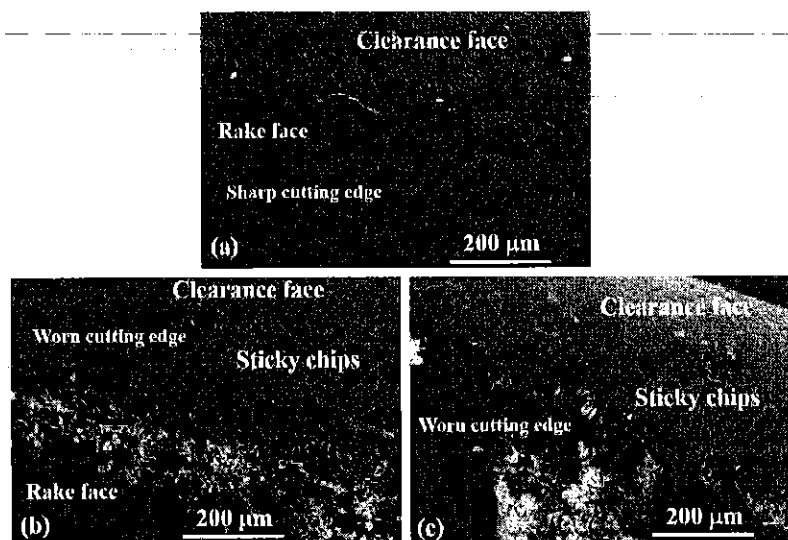
hướng sợi -45° . Tuy nhiên, khi chiều dài gia công tăng lên 300 cm, bằng cách sử dụng độ phóng đại 400 μm , có thể thấy mức độ hư hỏng gia công cao hơn dưới dạng các miệng hố hoặc rãnh nằm ở hướng sợi -45° . Kéo sợi là loại khuyết tật chủ yếu được quan sát thấy trong trường hợp này. Các khuyết tật gia công chủ yếu được quan sát thấy ở vị trí của góc sợi -45° như đã đề cập trước đây do cơ chế của sự hình thành phoi [28]. Thật vậy, trong trường hợp này, sự di chuyển của các cạnh cắt gây ra sự dịch chuyển và biến dạng nghiêm trọng ngoài mặt phẳng của các sợi tạo ra các khuyết tật gây ra ở dạng kéo sợi và cắt nội lớp phân tách dọc theo giao diện vật liệu nền sợi [29]. Đây là lý do tại sao bề mặt gia công tại các vị trí sợi -45° không đều hơn so với các vị trí sợi khác [30]. Ở khoảng cách xa hơn, có thể quan sát thấy rằng chất lượng bề mặt gia công kém nhất được nhận khi gia công với tốc độ chạy dao nhỏ. Điều này là do ở tốc độ chạy dao nhỏ, các khu vực tiếp xúc giữa phôi và lưỡi cắt tăng lên. Do đó, mức độ ma sát lớn hơn thu được và dẫn đến tăng nhiệt độ gia công, và cuối cùng làm cho lưỡi cắt nhanh chóng bị mòn [18]. Theo kết quả được trình bày trong nghiên cứu của Wang và cộng sự.[31], vật liệu được đẩy thay vì bị cắt như ở chiều dài gia công ngắn, và việc gia công khó khăn hơn do tiếp xúc rộng hơn giữa lưỡi cắt và phôi. Các hồi vị của phoi trở lại do phục hồi đàn hồi sau khi dụng cụ vượt qua được quan sát bằng thực nghiệm trong trường hợp này. Vùng này trở lại gấp đôi so với bán kính cắt cạnh ở các vị trí sợi là -45° . Do đó, bề mặt gia công thô hơn ở độ dài gia công dài hơn. Thông tin này có thể được xác nhận bởi các hình ảnh SEM trong Hình 3.5 cho thấy quá trình mài mòn của lưỡi cắt để cắt khoảng cách khác nhau với cùng điều kiện gia công đã đề cập trước đó. Các kiểu mòn của dụng cụ về bán kính mũi của lưỡi cắt bị ảnh hưởng chủ yếu bởi chiều dài gia công. Thật vậy, từ Hình 3.5-a và -b, sau chiều dài gia công 1,5 m, bán kính của lưỡi cắt đã được sửa đổi quan trọng, cụ thể là lưỡi cắt bị mòn và lớn hơn so với trước khi gia công (lưỡi cắt sắc). Hơn nữa, trong trường hợp này, các phoi siêu nhỏ ở dạng bụi bị mắc kẹt trong mặt trước của lưỡi cắt được hình dung. Khi chiều dài gia công đạt 3,0 m, việc sửa đổi cạnh cắt ở mức cao hơn và các phoi bám dính hơn ở mặt trước cũng được hình dung. Quan sát tương tự cũng được ghi nhận trong nghiên cứu của Haddad và cộng sự. [18]. Các tác giả được đề cập giải thích rằng

nhiệt độ gia công có thể đạt đến nhiệt độ chuyển tiếp thủy tinh (T_g) của vật liệu nền, điều này có lợi cho độ bám dính của các phoi bị vỡ trên bề mặt hoạt động của các dụng cụ. Ở chiều dài gia công cao hơn, bán kính cạnh cắt lớn hơn dẫn đến tăng nhiệt độ. Đây là lý do tại sao các phoi bám dính hơn được nhìn thấy trong Hình 3.5-

c.



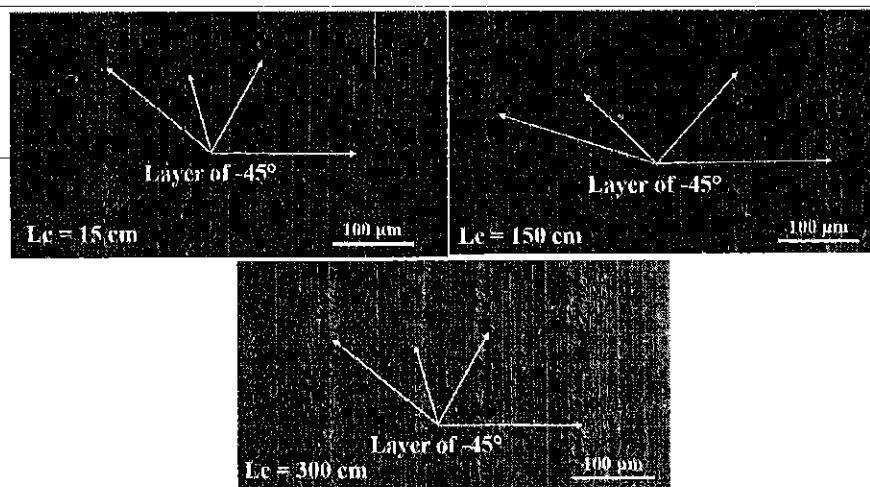
Hình 3.4. Khuyết tật gia công quan sát được với tốc độ chạy dao 500 mm/phút và tốc độ trục chính 8000 vòng/phút



Hình 3.5. Hình ảnh SEM của các cạnh cắt (a) trước khi gia công và sau chiều dài gia công (b) 1,5 m, (c) 3,0 m cho tốc độ trục chính 8000 vòng/phút với tốc độ chạy dao 500 mm/phút.

Xem xét sự thay đổi của khuyết tật gia công với chiều dài gia công ở điều kiện cắt 1000 mm/phút tốc độ chạy dao và tốc độ trục chính 8000 vòng/phút, mức độ khuyết tật gia công gần như giống hệt nhau bất kể chiều dài gia công (Hình 3.6).

Điều này có thể được giải thích là chiều dài cắt nhỏ, tức là dụng cụ cắt có thể được coi là mới, khuyết tật gia công của bề mặt chủ yếu bị ảnh hưởng bởi độ dày lý thuyết của phôi [32]. Tuy nhiên, khi chiều dài cắt tăng lên, bán kính của lưỡi cắt cũng tăng lên làm cho quá trình gia công trở nên khó khăn hơn [33]. Đây là hiện tượng hao mòn của dụng cụ cắt. Tuy nhiên, trong điều kiện cắt này, độ mòn của dụng cụ tăng không đáng kể do thời gian tiếp xúc nhỏ giữa phôi và lưỡi cắt so với tốc độ chạy dao 500 mm/phút. Do đó, mức độ khuyết tật gia công tăng rất ít khi chiều dài gia công tăng lên [11]. Gia công với tốc độ chạy dao 1500 mm/phút, sự thay đổi của mức độ khuyết tật gia công với chiều dài gia công tương tự như tốc độ chạy dao 1000 mm/phút. Những kết quả này phù hợp với những kết quả được ghi nhận bởi Nguyen Dinh và cộng sự [17]. Kết quả thí nghiệm trong nghiên cứu này cho thấy quan sát tương tự bề mặt gia công khi sử dụng tốc độ trục chính 10000 vòng/phút bất kể tốc độ chạy dao. Do đó, những kết quả này không được trình bày trong nghiên cứu này.

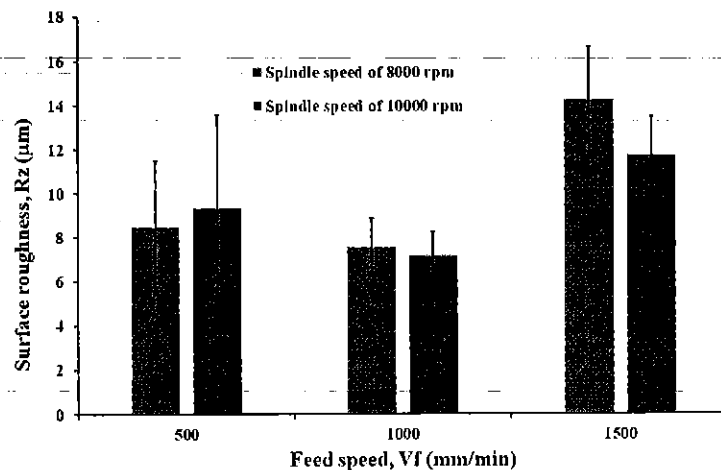


Hình 3.6. Khuyết tật gia công quan sát được với tốc độ chạy dao 1000 mm/phút và tốc độ trục chính 8000 vòng/phút.

3.3.2. Ảnh hưởng của các thông số quá trình đến chất lượng gia công

Trong đề tài này, khuyết tật gia công sẽ được định lượng nhằm mục đích kiểm tra chất lượng gia công bằng cách sử dụng độ nhám bề mặt trung bình mười điểm (R_z) thay vì sử dụng độ nhám bề mặt trung bình số học (R_a). Điều này là theo khuyến nghị của các tác giả trong tài liệu [11] trong đó kết luận rằng R_z phản ứng nhanh hơn với các thông số gia công so với R_a và do đó phù hợp hơn để thể hiện độ

nhám bề mặt của vật liệu composite. Hình 3.7 cho thấy sự biến thiên của độ nhám bề mặt như một hàm của các thông số gia công. Kết quả cho thấy độ nhám bề mặt giảm khi tốc độ chạy dao thay đổi từ 500 mm/phút đến 1000 mm/phút, nhưng tăng khi tốc độ ăn dao thay đổi từ 1000 mm/phút đến 1500 mm/phút. Những chiều hướng này tương tự trong cả hai trường hợp tốc độ trục chính. Đối với trường hợp đầu tiên, ví dụ: tốc độ chạy dao thay đổi từ 500 mm/phút đến 1000 mm/phút, độ nhám bề mặt (R_z) giảm từ 8,46 μm xuống 7,56 μm tương ứng với mức giảm 10,7% đối với tốc độ trục chính là 8000 vòng/phút. Tỷ lệ phần trăm giảm độ nhám bề mặt là 23,3% cho tốc độ trục chính là 10000 vòng/phút. Đối với trường hợp thứ hai, tức là tốc độ chạy dao thay đổi từ 1000 mm/phút đến 1500 mm/phút, nhận thấy rằng độ nhám bề mặt tăng 88,3% (từ 7,56 μm lên 14,24 μm) và 63,9% (từ 7,16 μm đến 11,73 μm) cho tốc độ trục chính lần lượt là 8000 vòng/phút và 10000 vòng/phút. Hơn nữa, có thể nhận ra rằng ảnh hưởng của tốc độ trục chính đến độ nhám bề mặt trong việc này là ít quan trọng. Điều này có thể là do phạm vi tốc độ trục chính được chọn là đủ để tạo ra các mức độ khuyết tật gia công khác nhau [34].



Hình 3.7. Ảnh hưởng của các thông số gia công đến độ nhám bề mặt (R_z)

Các kết quả trong Hình 3.7 có thể được giải thích rằng khi tốc độ chạy dao tăng lên và/hoặc tốc độ trục chính giảm, độ dày lý thuyết của vật liệu cần cắt cũng sẽ tăng [2]. Tuy nhiên, khi gia công với tốc độ chạy dao thấp, độ mòn của dụng cụ tăng nhanh [18]. Điều này làm cho ảnh hưởng của mài mòn dụng cụ cắt chiếm ưu thế so với ảnh hưởng của điều kiện cắt đến độ nhám bề mặt [34]. Vì lý do này, có thể thấy rằng độ nhám bề mặt trên nhánh thứ nhất và thứ hai của Hình 3.7 có hướng

biến đổi ngược nhau. Đó là, khi tốc độ chạy dao tăng từ 500 mm/phút lên 1000 mm/phút, độ nhám bề mặt giảm chủ yếu do ảnh hưởng của mài mòn, và trong trường hợp còn lại, độ nhám bề mặt sẽ tăng lên do ảnh hưởng của các thông số gia công (hoặc độ dày phoi) là quan trọng. Kết quả của các biến thể về độ nhám bề mặt này đối với điều kiện cắt tương tự như sự thay đổi mức độ khuyết tật bề mặt cho chế độ cắt như đã trình bày trong phần trước của nghiên cứu này. Kết quả trong nghiên cứu này trái ngược với kết quả được ghi nhận bởi [2, 32] nơi các tác giả chỉ ra rằng gia công với tốc độ chạy dao thấp và tốc độ cắt cao có thể tạo ra chất lượng tốt của bề mặt gia công.

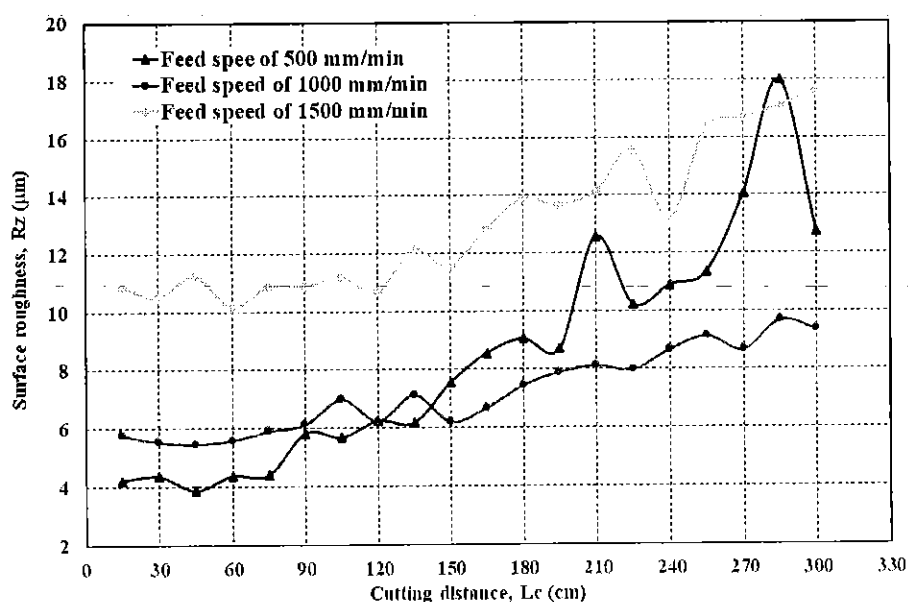
3.3.3. Ảnh hưởng của bán kính lưỡi cắt đến chất lượng gia công

Lưu ý rằng các giá trị của độ nhám bề mặt được hiển thị trong Hình 3.6 là trung bình cộng của tất cả các giá trị đo được của mỗi điều kiện cắt. Do đó, các giá trị của độ lệch chuẩn là rất lớn, giá trị cao nhất là 4,23 m được đưa ra bởi điều kiện gia công tốc độ trục chính là 10000 vòng/phút và tốc độ chạy dao là 500 mm/phút. Lý do là vì sự phân tán rất lớn giữa các giá trị đo được tại 20 đường chạy dao của mỗi điều kiện cắt. Đặc biệt, ở tốc độ chạy dao 500 mm/phút (trong cả hai trường hợp là tốc độ trục chính), độ lệch chuẩn của độ nhám bề mặt là lớn nhất. Đây là một sự phản ánh rõ ràng khác về sự mài mòn trên bề mặt gia công composite CFRP. Ảnh hưởng của mài mòn về chiều dài gia công đến độ nhám bề mặt có thể được trình bày chi tiết trong Hình 3.7 đối với tốc độ trục chính là 8000 vòng/phút. Sự gia tăng độ nhám lớn nhất với chiều dài gia công là khi sử dụng tốc độ chạy dao 500 mm/phút, tăng từ 3,33 μm lên 15,33 μm tương ứng với 203,1%. Độ nhám bề mặt tăng khi tăng chiều dài gia công lần lượt là 62,2% và 61,7% đối với tốc độ chạy dao lần lượt là 1000 mm/phút và 1500 mm/phút. Sự gia tăng độ nhám bề mặt này là do sự gia tăng bán kính của lưỡi cắt, làm cho quá trình cắt trở nên khó khăn hơn như được trình bày trong Hình 3.5 [31]. Bán kính tiên tiến có thể được đo bằng Kính hiển vi kỹ thuật số Keyence VHX-6000 như trong Hình 3.9. Sự gia tăng bán kính cạnh cắt ở hai chiều dài gia công 15 cm và 300 cm với tốc độ chạy dao 500 mm/phút và tốc độ trục chính 8000 vòng/phút được thể hiện trong Hình 3.10. Kết quả cho thấy ở chiều dài gia công 15 cm, bán kính cắt cạnh là 9 μm , trong khi ở chiều

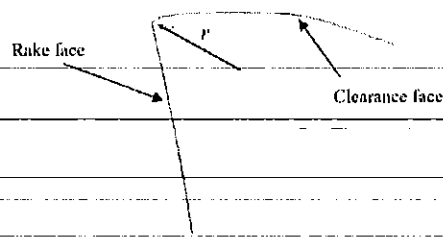
dài gia công 300 cm, bán kính là 22 μm .

Sự phụ thuộc của độ nhám bề mặt vào chiều dài gia công được quan sát tương tự trong trường hợp tốc độ trục chính 10000 vòng/phút như trong Hình 3.11. Sự gia tăng cao nhất của độ nhám bề mặt với chiều dài gia công tăng ở tốc độ chạy dao là 500 mm/phút. Ví dụ, độ nhám bề mặt tăng 360,3% khi chiều dài gia công đạt 3,0 m ở tốc độ chạy dao 500 mm/phút, trong khi mức tăng tương đối ở tốc độ chạy dao 1000 mm/phút và 1500 mm/phút lần lượt là 54,7% và 52,5%.

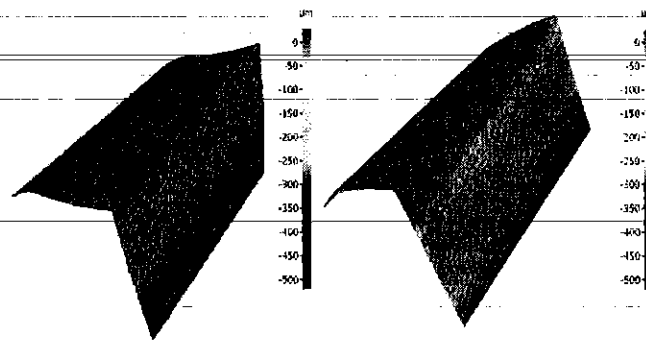
Có thể thấy rằng ở đây là sự vượt trội so với tất cả về tăng độ nhám bề mặt (360,3%) của các điều kiện gia công với lượng chạy dao 500 mm/phút so với điều kiện cắt khác. Nguyễn Đình Ngọc và cộng sự. [33] giải thích rằng khi gia công với tốc độ trục chính cao, nếu trải dài đường xoắn ốc, bề mặt tiếp xúc giữa dụng cụ và phôi sẽ lớn hơn so với khi cắt với tốc độ trục chính nhỏ. Điều này kết hợp với số lượng lớn các tiếp điểm trên một đơn vị thời gian khi gia công với tốc độ chạy dao nhỏ dẫn đến tăng ma sát và nhiệt, dẫn đến mài mòn dụng cụ nhanh hơn [11]. Tốc độ mài mòn của dụng cụ cắt ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng của bề mặt gia công, sẽ có nhiều loại khuyết tật xuất hiện, điều này làm cho giá trị của độ nhám bề mặt lớn. Bán kính cạnh cắt do Keyence đưa ra cho điều kiện gia công này là 28 μm .



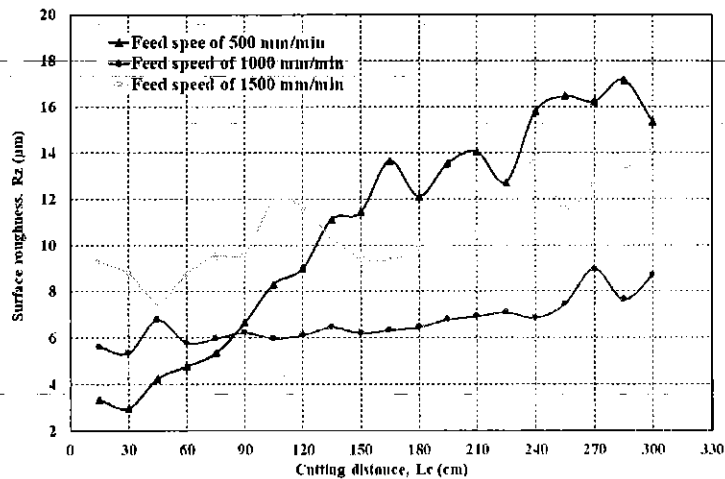
Hình 3.8. Sự biến thiên của Rz so với chiều dài gia công khi tốc độ trục chính 8000 vg/ph



Hình 3.9. Biên dạng của bán kính lưỡi cắt được đo bằng phần mềm có sẵn trong Kính hiển vi kỹ thuật số Keyence VHX-6000.



Hình 3.10. Hình dạng cắt sau khi gia công ở chiều dài (a) 15 cm và (b) 300 cm với tốc độ chạy dao 500 mm/phút và tốc độ trục chính 8000 vòng/phút.



Hình 3.11. Sự phát triển của Rz so với chiều dài gia công cho tốc độ trục chính là 10000 vòng/phút

Tài liệu tham khảo chương 3

1. Ghidossi, P., M. El Mansori, and F. Pierron, Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004. 35(7-8): p. 989-999.
2. Sheikh-Ahmad, J., N. Urban, and H. Cheraghi, Machining Damage in Edge Trimming of CFRP. Materials and Manufacturing Processes, 2012. 27(7): p. 802-808.

3. Duboust, N., và cộng sự., An optical method for measuring surface roughness of machined carbon fibre-reinforced plastic composites. *Journal of Composite Materials*, 2016. 51(3): p. 289-302.
4. Slamani, M., H. Chafai, and J.F. Chatelain, Effect of milling parameters on the surface quality of a flax fiber-reinforced polymer composite. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022.
5. Haddad, M., và cộng sự., Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior. *Composites Part B: Engineering*, 2014. 57: p. 136-143.
6. Hejjaji, A., và cộng sự., Surface and machining induced damage characterization of abrasive water jet milled carbon/epoxy composite specimens and their impact on tensile behavior. *Wear*, 2017. 376-377: p. 1356-1364.
7. Hintze, W., D. Hartmann, and C. Schütte, Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study. *Composites Science and Technology*, 2011. 71(15): p. 1719-1726.
8. Slamani, M., J.-F. Chatelain, and H. Hamedanianpour, Influence of machining parameters on surface quality during high speed edge trimming of carbon fiber reinforced polymers. *International Journal of Material Forming*, 2018. 12(3): p. 331-353.
9. Ngoc, N.D., và cộng sự., The Characterization of Machined Damage of CFRP Composite: Comparison of 2D and 3D Surface Roughness Performance, in *Advances in Engineering Research and Application*. 2020. p. 771-779.
10. Nguyen-Dinh, N., C. Bouvet, and R. Zitoune, Influence of machining damage generated during trimming of CFRP composite on the compressive strength. *Journal of Composite Materials*, 2019. 54(11): p. 1413-1430.
11. Haddad, M., và cộng sự., Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014. 66: p. 142-154.
12. Prakash, R., và cộng sự., High-Speed Edge Trimming of CFRP and Online Monitoring of Performance of Router Tools Using Acoustic Emission. *Materials (Basel)*, 2016. 9(10).
13. Fulemova, J. and Z. Janda, Influence of the Cutting Edge Radius and the Cutting Edge Preparation on Tool Life and Cutting Forces at Inserts with Wiper Geometry. *Procedia Engineering*, 2014. 69: p. 565-573.
14. El-Ghaoui, K., J.-F. Chatelain, and C. Ouellet-Plamondon, Effect of Graphene on Machinability of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019. 3(3).
15. König, W., và cộng sự., Machining of Fibre Reinforced Plastics. *CIRP Annals*, 1985. 34(2): p. 537-548.
16. M. Ucar, Y.W., End-milling machinability of a carbon fiber reinforced laminated composite-M-Ucar.pdf. 2003.
17. Nguyen-Dinh, N., và cộng sự., Surface integrity while trimming of composite structures: X-ray tomography analysis. *Composite Structures*, 2019. 210: p. 735-746.

18. Madjid Haddad and Redouane Zitoune, F.E., Bruno Castanié, Machinability and surface quality during high speed trimming of multi directional CFRP. *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, 2013.
19. G. Caprino, I.D.I., L. Nele and L. Santo, Effect of tool wear on cutting forces in the orthogonal cutting of unidirectional glass fibre-reinforced plastics. 1996.
20. Nor Khairusshima, M.K., và cộng sự., Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic. *Wear*, 2013. 302(1-2): p. 1113-1123.
21. Ozkan, D., và cộng sự., The Effects of Cutting Parameters on Tool Wear During the Milling of CFRP Composites. *Materials Science*, 2019. 25(1).
22. Wang, F.-j., và cộng sự., Effects of cutting edge radius and fiber cutting angle on the cutting-induced surface damage in machining of unidirectional CFRP composite laminates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017. 91(9-12): p. 3107-3120.
23. Hosokawa, A., và cộng sự., High-quality machining of CFRP with high helix end mill. *CIRP Annals*, 2014. 63(1): p. 89-92.
24. Aisyah-Madiah Mustafa, N.S.S., Nor Farah Huda Abdul and A.N.R.a.M.A.H. Halim*, The Effect of Cutting Speeds on Tool Wear and Surface Roughness when Milling Carbon Fiber Reinforced Polymer. 2021.
25. Elgnemi, T., và cộng sự., Experimental Investigation on Dry Routing of CFRP Composite: Temperature, Forces, Tool Wear, and Fine Dust Emission. *Materials (Basel)*, 2021. 14(19).
26. Palanikumar, K. and J.P. Davim, Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009. 209(1): p. 511-519.
27. Aisyah Madiah Mustafa, N.S.S., Nor Farah Huda Abdul and A.N.R.a.M.A.H. Halim*, The Effect of Cutting Speeds on Tool Wear and Surface Roughness when Milling Carbon Fiber Reinforced Polymer. 2022.
28. D.H. Wang, M.R., D. Arola, orthogonal cutting mechanism of graphite-epoxy composite. Part II Multil-directional laminate. 1995.
29. D. H. WANGt, M.R.a.D.A., Orthogonal cutting mechanisms of graphite epoxy composite. Part I unidirectional laminate. *Int. J. Mach. Tools Manufact*, 1995. 35.
30. Sheikh-Ahmad, J.Y., *Machining of polymer composites*. 2009.
31. Wang, X.M. and L.C. Zhang, An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003. 43(10): p. 1015-1022.
32. Prashanth Janardhan, J.S.-A.a.H.C., Edge Trimming of CFRP with Diamond Interlocking Tools. SAE Technical Paper 2006.
33. Nguyen-Dinh, N., và cộng sự., New tool for reduction of harmful particulate dispersion and to improve machining quality when trimming carbon/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020. 131.
34. Nguyen Dinh Ngoc , P.V.T., and Nguyen Thi Hue, Effects of Machining Configurations and Process Parameters on the Machining Damage Generated During Milling CFRP Structures. *The 4th International Conference on Engineering Research and Applications – ICERA 2021*, 2022:

p. 400-406.

KẾT LUẬN

Nghiên cứu thực nghiệm về phân tích bụi về số lượng và khối lượng trong quá trình gia công vật liệu composite CFRP đa hướng bằng dụng cụ PCD được thể hiện trong công trình nghiên cứu này. Ảnh hưởng của các thông số cắt (tốc độ cắt, tốc độ chạy dao và độ sâu cắt), hình dạng dụng cụ và độ mòn của dụng cụ về chiều dài gia công được tiến hành. Các kết luận về kết quả nghiên cứu của nghiên cứu này được tóm tắt bằng các kết quả chính như sau:

- Hình ảnh SEM được thực hiện trên bụi thu thập, đã chỉ ra sự hiện diện của ba dạng phoi chính viz. bột mịn (vật liệu nền và sợi), sợi tự do và mảnh sợi - khối vật liệu nền.
- Số lượng và khối lượng của các hạt có hại bị ảnh hưởng đáng kể bởi hình dạng dụng cụ, trong đó dụng cụ cắt 2SF tạo ra tối đa cả số lượng và khối lượng của các hạt có hại, tiếp theo là các hạt thu được từ dụng cụ cắt 2HF và 4SSF tương ứng. Những kết quả này có thể được quy cho sự khác biệt của hình dáng dụng cụ. Trong đó các hạt bám dính được quan sát thấy trong răng cưa và rãnh cắt dài là rất nhiều trong trường hợp dụng cụ cắt 4SSF. Tuy nhiên, mức độ thấp hơn của các hạt bám dính được hình dung trong trường hợp dụng cụ cắt 2HF và 2SF. Do đó, các hạt được tạo ra không thể dễ dàng phát ra trong không khí do ngăn chặn các hạt bám dính như đã đề cập trước đây.
- Việc tăng tốc độ chạy dao và giảm tốc độ cắt gây ra việc giảm số lượng và khối lượng của các hạt có hại trong không khí và làm tăng sự hình thành các phoi với các dạng khối vật liệu nền sợi. Tuy nhiên, ảnh hưởng của chiều sâu cắt của vết cắt đến số hạt có hại là không rõ ràng, ví dụ khối lượng và số lượng hạt có hại tăng khi độ lệch tâm của vết cắt tăng từ 1 mm lên 2 mm, nhưng giảm khi độ sâu cắt tăng từ 2 mm lên 3 mm.
- Việc tăng chiều dài gia công cũng gây ra việc giảm số lượng và khối lượng của các hạt có hại. Điều này là do thực tế là ở chiều dài gia công dài hơn, các cơ chế hình thành phoi là do gãy do sự kết hợp giữa uốn và vênh cục bộ, không giống như các cơ chế cắt cho dụng cụ mới (với bán kính cắt $\approx 3\mu\text{m}$).

Đôi với giá trị cao hơn của bán kính cắt cạnh, xác suất thu được phoi ở dạng sợi tự do và khối vật liệu nền sợi là nổi bật hơn. Cuối cùng, các phoi cứng hơn được tạo ra tương ứng với kích thước lager của các hạt do trọng lượng nặng hơn nhanh chóng giảm trên nền tảng gia công. Ví dụ, khi gia công được tiến hành với tốc độ chạy dao 500 mm/phút và chiều sâu cắt là 2 mm, các hạt có hại giảm 13% khi chiều dài gia công thay đổi từ 0,28 m đến 1,68 m.

- Khi khối lượng các hạt có hại được tạo ra trong quá trình gia công làm giảm giá trị PEL (5 mg/mm^3), các thiết bị bảo vệ rất được khuyến khích cho người vận hành để đảm bảo an toàn.
- Kết quả đánh giá định tính chất lượng bề mặt của tấm composite CFRP được thể hiện thông qua các quan sát SEM. Có thể thấy rằng các khuyết tật gia công phụ thuộc vào điều kiện cắt khi chiều dài cắt nhỏ và khi chiều dài cắt lớn hơn, ảnh hưởng của mài mòn có ý nghĩa đáng kể đến sự hình thành các khuyết tật gia công (quan sát qua SEM). Đặc biệt là khi gia công với tốc độ chạy dao nhỏ.
- Kết quả đo độ nhám bề mặt phản ánh tốt chất lượng gia công khi mô tả chính xác sự phát triển trong sự xuất hiện của các khuyết tật gia công được SEM quan sát thấy như được mô tả trong phần trước. Đó là, khi chiều dài gia công được tăng lên, gia công với tốc độ chạy dao nhỏ, do tiếp xúc lớn giữa dụng cụ cắt và phôi, làm tăng ma sát và nhiệt cắt, dẫn đến sự mài mòn nhanh chóng của lưỡi cắt.
- Chiều dài gia công, được đặc trưng bởi sự gia tăng bán kính cạnh cắt, có ảnh hưởng lớn đến chất lượng của bề mặt gia công. Khi gia công với tốc độ chạy dao lớn, do chiều dài tiếp xúc nhỏ, tốc độ mài mòn của lưỡi cắt trong những trường hợp này tăng chậm, dẫn đến ít thay đổi về chất lượng của bề mặt gia công cả về mặt đánh giá. Trong khi đó, khi gia công với tốc độ chạy dao nhỏ, chiều dài tiếp xúc giữa lưỡi cắt và phôi tăng lên, làm cho ma sát và nhiệt tăng lên, làm tăng nhanh bán kính đầu. Cuối cùng, chúng ta có thể thấy rằng khi gia công với tốc độ chạy dao nhỏ, độ nhám bề mặt tăng nhanh lần lượt là

203,1% và 360,3% trong các trường hợp gia công theo tốc độ quay trực
chính là 8000 vòng/phút và 10000 vòng/phút.

Influences of Main Machining Process Parameters and Tool Wear on The Machining Damage Generated During Edge Milling CFRP Composites

Nguyen Thi-Hue, Nguyen Dinh-Ngoc*
Thai Nguyen University of Technology, VIETNAM
*ngocnd@tnut.edu.vn

ABSTRACT

Machining Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRPs) composites are typically accompanied by the appearance of machining damage which strongly impacts the structural integrity of composite parts during their service lives. Studying the correlation between machining damage and its affected factors has still been an open issue. Hence, it is necessary to do more research. This study focuses on investigating the influences of main process parameters and tool wear phenomenon in terms of machining length on the machining quality which was characterized by the surface roughness criterion, the ten-point max, Rz. A full factorial design of experiments was conducted including three levels of feed speed and two degrees of spindle speed. The results revealed that machining damage was mainly influenced by process parameters at a small machining distance, whereas at a longer machining distance, tool wear had a dominant effect on the machining quality than machining parameters. These findings could provide guidelines for selecting suitable machining parameters to enhance the machining quality of CFRP.

Keywords: CFRPs; Machining Quality; Edge Milling; Cutting Condition; SEM

Introduction

In recent decades, CFRP composites have been widely accepted in several

important industries such as automotive, shipping, aircraft, and sports equipment because of their advantages including dimensional stability, high specific strength, and low density. Composite parts are frequently fabricated to near-net shapes to suit certain applications [1], but excess materials in the edge of moulded CFRP parts must be removed to get the required dimensions for assembly by secondary operations like milling, drilling and trimming processes [2]-[4]. There have been the fact machining processes of CFRP composites are frequently associated with the occurrence of machining defects in the machined surfaces [5]-[6] such as matrix cracking, matrix fibre interface debonding, matrix degradation, fibre pullout [7]-[9]. The induced machining defects may harmfully impact the machined surface integrity and the mechanical properties of CFRP structures during their service lives [5], [10]. For this reason, it is necessary to clearly know and suitably select the factors which influence the generation of defects, including machining parameters, tool geometries, and the wear phenomenon of cutting tools [11]-[13].

El-Ghaoui et al. [14] showed that the combination of high cutting speed and low feed speed induces better quality of machined surface when machining composite materials generates a smaller level of theoretical chip thickness or volume of cut materials, hence machining process is easy to perform. Similar results were also observed in the studies of other researchers [15]-[16]. However, other studies [17] revealed that machining at low feed speeds and high cutting speeds can result in severe defects due to the effects of tool wear. This finding is also identically documented in the study of Haddad et al. [18]. In machining CFRP laminates, because of the low thermal conductivity of the matrix component and the highly abrasive nature of carbon fibre, the contacting areas occur friction phenomenon making the cutting edge become quickly worn out. The evaluation of tool wear can be conducted by flank wear [19]-[21], and the radius of the cutting edge [22] or by machining length [23]. Almost studies in the literature have concluded that cutting speed and feed rate have strong influences on the generation of flank wear [21]-[24]. Elgnemi et al. [25] detailed that an increase in cutting speed or an increase in feed rate leads to augmenting the average tool wear. Moreover, feed rate has more impact on tool wear than that of cutting speed. This result is consistent with those documented by [26]. However, in the study of [27], the authors showed that cutting speed has a stronger impact on tool wear compared with those feed rates because cutting speed is the major factor influencing cutting temperatures.

It is clear that there have been contradictory results on the machinability of composite materials given by researchers. Despite numerous recent studies on machining composites, it remains a challenging task due to the material behaviour depending on non-homogeneity, anisotropy, and diverse reinforcement and matrix properties. The responses between cutting tools and different workpiece materials can be completely different.

Therefore, results in an experimentally particular study are not always fully applicable to those of another specific study. In order to answer the gaps which, contain the ambiguity in the machining composite study, the impacts of machining parameters and tool wear on machining quality when carrying out edge trimming of CFRP composites were experimentally studied in this research. Average surface roughness was selected to characterize machining quality. Six new carbide-cutting tools with three-helix flutes were used for testing. A full experimental design showing the combinations between three levels of feed speed and two levels of spindle speed was used to investigate the impact of machining parameters on machining quality. The effects of tool wear on the machining quality were conducted based on the evolution of machining length.

Experimental Procedure

The specimens used in this study were fabricated by laminating P2352 prepregs according to the stacking sequence of $[90^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ/90^\circ]_s$, where each ply has a thickness of 0.26 mm. The total theoretical dimension of each plate is 300 x 300 x 5.2 mm. Before the milling test, each plate was cut into the size of 300 x 150 x 5.2 mm with the cutting direction along 150 mm length. The CFRP properties are further described in Table 1. A Mazak vertical centre smart 530C (Yamazaki Mazak Corporation, Japan) was utilized to perform the edge milling tests. Six cutting conditions were carried out, with the combination of three feed speeds V_f (500 mm/min, 1000 mm/min, and 1500 mm/min) and two spindle speeds N , (8000 rpm, and 10000 rpm). All tests were performed without coolant (dry machining). Each cutting condition was carried out with the machining length of 3.0 m or 3000 mm, and the feed direction parallel to the dimension of 150 mm of CFRP plate. This corresponds to twenty tool paths of the edge milling process (20 x 150 mm=3000 mm). Six new carbide tools (three-helix flutes, 6 mm shank diameter, helix angle of 45°, rake angle of 11°, and clearance angle of 9° - Figure 1) were used in edge milling. The machined surface was unfixed and quantitatively evaluated by measuring surface roughness, R_z , and its average values were calculated by three measurements. A roughness tester namely SJ-210 Mitutoyo (Mitutoyo Corporation, Japan) with a cut-off length of 0.8 mm and transverse length of 5.0 mm was employed to test the machining quality. The optical images of the cutting tool were taken by KEYENCE VHX-6000 digital microscope to state the tool wear phenomenon (Figure 2). In order to quantify the state of machining damage induced, the microstructure of machined surfaces was investigated by Scanning Electron Microscope (SEM) referenced under "JEOL-JSM 5410 LV" (Figure 3).

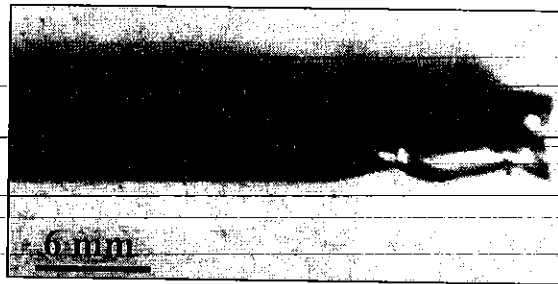


Figure 1: Carbide milling cutter with three-helix cutting edges

Table 1: Mechanical properties of P2352 prepreg

Density (g/cm ³)	Longitudinal shear modulus (GPa)	Longitudinal Young's modulus (GPa)	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Poisson's ratio
2.63	6.21	162	1552	2844	0.34

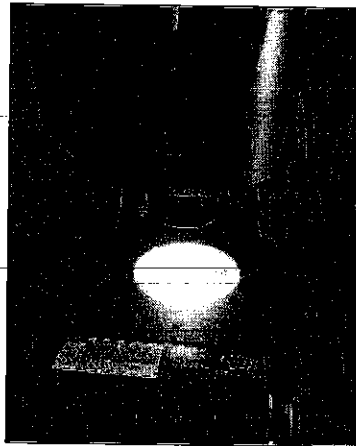


Figure 2: Keyence VHX-6000 digital microscope

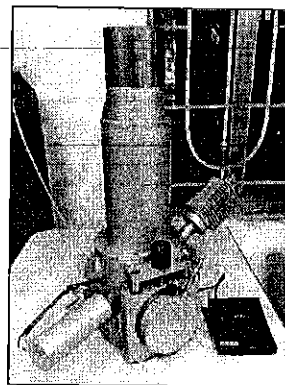


Figure 3: SEM machine referenced under JEOL-JSM 5410 LV

Results and Discussion

Analysis of induced defects observed in machined surface

After machining, the microstructures of the machined surface were analysed by using SEM observation. Three positions of machining length (L_c) were considered for each cutting condition, e.g. $L_c=15$ cm, 150 cm, and 300 cm. Figure 4 presents SEM images of the machined surface obtained at a spindle speed of 8000 rpm and feed speed of 500 mm/min. The results indicated that there was no significant difference in machining defect levels between those at machining lengths of 15 cm and 150 cm where small levels of machining defects were visualized at the fibre direction of -45° . However, at a machining length of 300 cm, a higher level of machining damage in the form of craters or valleys sited at the fibre direction of -45° was observed when using the magnification of 400 μm . The dominant type of damage observed in this case was fibre pullout. The nature of fibre pullout is due to the fact that the advance of cutting edges causes the severe out-of-plane displacement and deformation of the fibres which generate the induced defects in the forms of fibre pullout, and delamination intralaminar shear along fibre-matrix interface [28]. The machining defects dominantly observed at the position of the fibre angle of -45° as previously mentioned are attributed to the chip formation [29]. Consequently, the machined surface at fibre locations of -45° was more irregular than that at other fibre locations [30]. It was observed that the worst quality of the machining surface was obtained at a longer distance when machining with a small feed speed. This is due to the increase in contact areas between the workpiece and the cutting edge, leading to a higher level of friction, higher machining temperatures and quicker wear of the cutting edge, accordingly [18]. Wang et al. [31] suggested that materials are pushed instead of being sheared at a short cutting distance, and trimming is more difficult due to wider contact between the cutting edge and the workpiece. In this case, the springs back caused by elastic recovery after the tool passer over are experimentally observed. The bouncing back region is twice bigger than the radius of the cutting edge in the fibre locations of -45° , resulting in rougher machined surfaces at longer machining lengths. This information was confirmed by the SEM images in Figure 5 which shows the wear process of cutting edge for different distance cutting with the same machining condition previously mentioned. The wear patterns of the tool in terms of the nose radius of the cutting edge were crucially influenced by the machining distance. Indeed, from Figures 5(a) and 5(b), after a machining distance of 1.5 m, the radius of the cutting edge was importantly modified, namely worn cutting edge, and bigger compared with that before machining (sharp cutting edge). Moreover, in this case, the microchips in the form of dust stuck in the rake face of the cutting edge were visualized. When the cutting distance reached 3.0 m, the modification of the cutting edge was a higher level, and more adhered chips in the rake face were also visualized. A

similar observation was also documented in the research of Haddad et al. [18]. They explained that the machining temperatures reached the glass transition temperature (T_g) of the matrix which favours the adhesion of the broken chips on the active surface of the tools. At higher cutting distances the bigger cutting edge radius led to an increase in temperatures. This was why more adhered chips were seen in Figure 5(c).

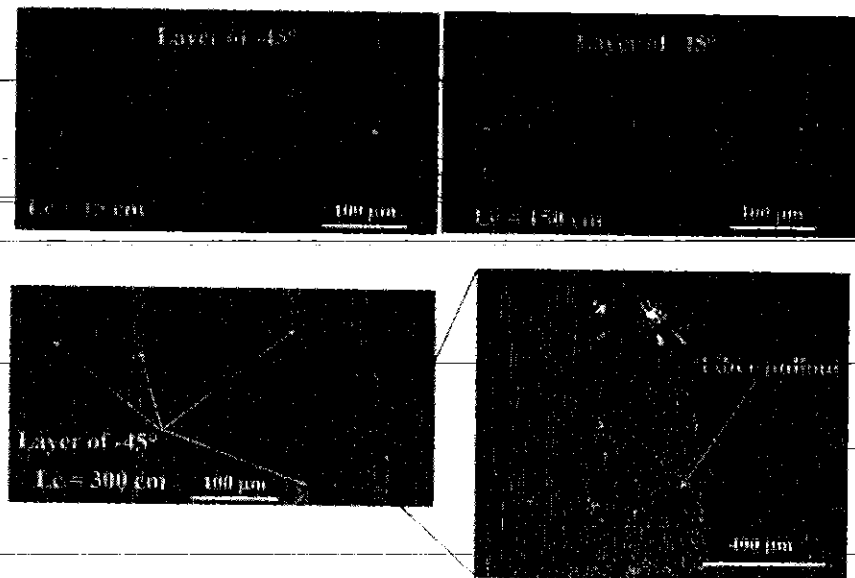


Figure 4: Machining damage observed with a feed speed of 500 mm/min and spindle speed of 8000 rpm

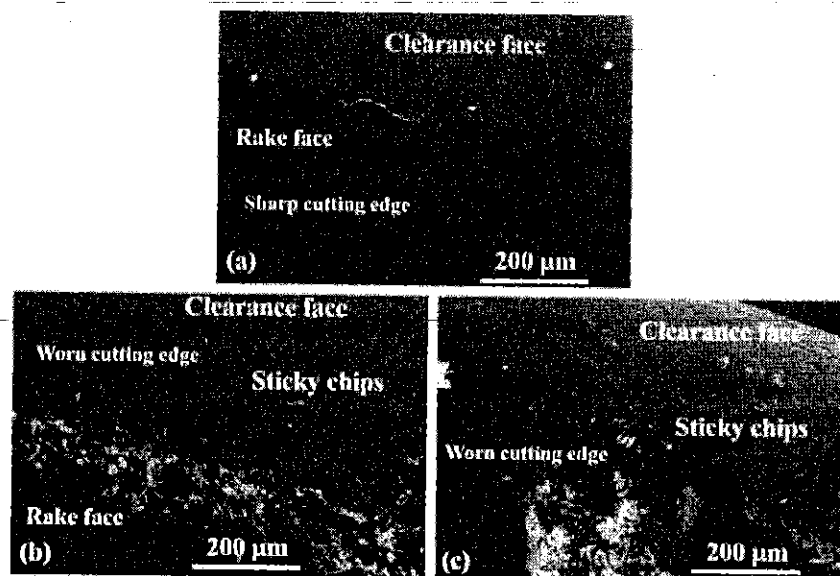


Figure 5. SEM images of cutting edges; (a) before machining and after machining distance of; (b) 1.5 m, and (c) 3.0 m for a spindle speed of 8000 rpm with a feed speed of 500 mm/min

At the cutting condition of 1000 mm/min feed speed and 8000 rpm spindle speed, the results depicted in Figure 6 showed that the machining damage level was almost identical regardless of machining length. This was explained as the cutting length is small, i.e. the cutting tool can be considered as new, and the machining damage of the surface is mainly influenced by the theoretical thickness of the chip [32]. However, as the cutting length increases, the radius of the cutting edge also increases, and the wear of the cutting edge becomes more significant, which leads to a more difficult machining process [33]. This is the wear phenomenon of cutting tools. Nevertheless, the tool wear in this cutting condition was insignificant due to the short contacting time between the workpiece and the cutting edge, in comparison with the case of a feed speed of 500 mm/min. Consequently, the degree of machining defects increases slightly as the machining length increases [11]. The variation of machining damage level with machining length at a feed speed of 1500 mm/min was similar to that given by a feed speed of 1000 mm/min. These results are consistent with those documented by Nguyen-Dinh et al. [17]. Moreover, it was observed that the machined surface exhibited similar characteristics when the spindle speed increased to 10000 rpm, regardless of the feed speed. Thus, the results obtained under this condition were not discussed in this text.

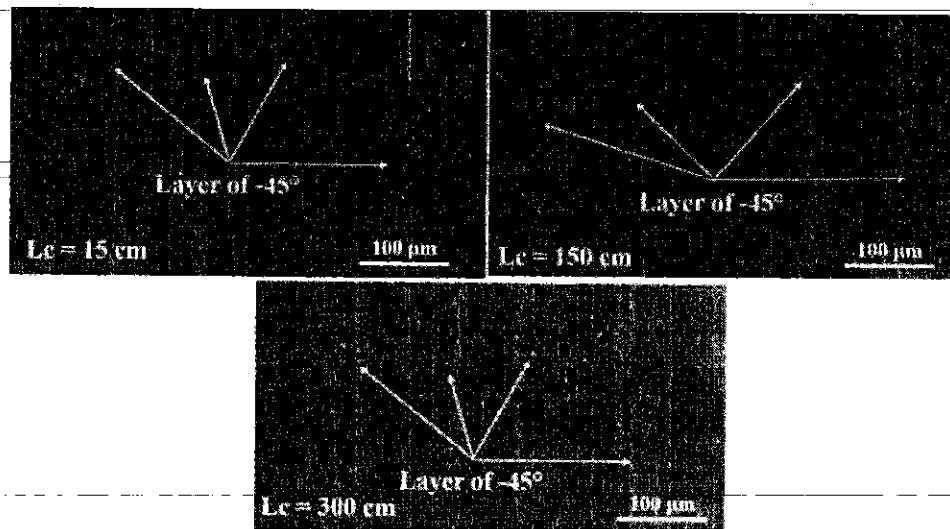


Figure 6: Machining damage observed with a feed speed of 1000 mm/min and spindle speed of 8000 rpm

Influence of process parameters on the machining quality

In this section, machining damage was quantitatively estimated to check machining quality by using ten-point mean (Rz) instead of using average surface roughness (Ra). This is according to the recommendations by the authors in the literature [11] where it was concluded that Rz is more

responsive to machining parameters than Ra and hence is more suitable for representing surface roughness of composite materials. Figure 7 shows the evolution of surface roughness as a function of machining parameters. The results showed that surface roughness decreases when feed speed varies from 500 mm/min to 1000 mm/min, but increases when feed speed changes from 1000 mm/min to 1500 mm/min. These tendencies were similarly observed in both cases of spindle speed. Regarding the first case, e.g. feed speed varies from 500 mm/min to 1000 mm/min, surface roughness (Rz) reduced from 8.46 μm to 7.56 μm corresponding to the reduction of 10.7% for a spindle speed of 8000 rpm, while the per cent reduction by 23.3% was for a spindle speed of 10000 rpm. Considering the second case, i.e. feed speed varies from 1000 mm/min to 1500 mm/min, it was noticed that surface roughness increased by 88.3% (from 7.56 μm to 14.24 μm) and by 63.9% (from 7.16 μm to 11.73 μm) for spindle speed of 8000 rpm and 10000 rpm, respectively. Moreover, it was realized that the effect of spindle speed on the surface roughness in this was less profound, likely due to the selected range of sufficient spindle speed to generate the different machining damage levels [34].

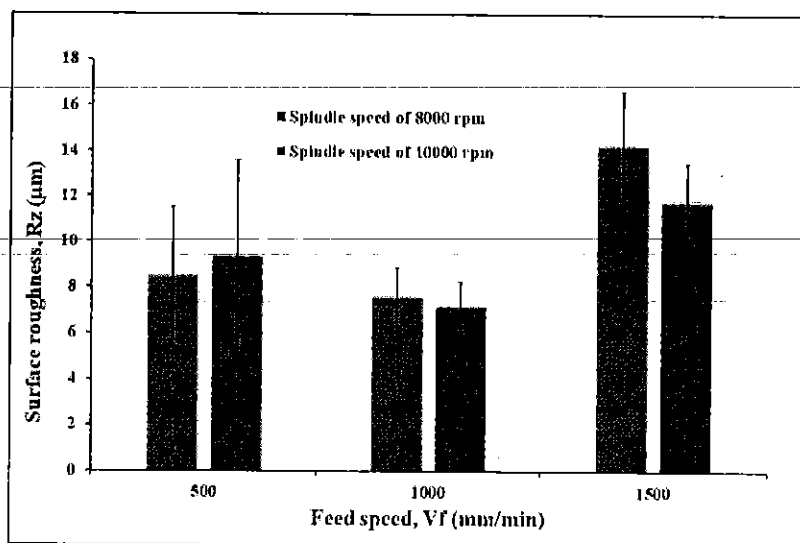


Figure 7: Influences of machining parameters on ten-point mean (Rz)

The results in Figure 7 can be interpreted that when the feed speed increases and/or the spindle speed decreases the theoretical thickness of the material to be cut also increases [2]. However, at low feed speed, tool wear increases rapidly [18], which makes the effect of cutting tool wear relatively more dominant than that of cutting condition on surface roughness [34]. This was why the surface roughness varies in opposite directions for the first and second branches of Figure 7. To be more specific, when the feed rate increased from 500 mm/min to 1000 mm/min, the surface roughness

decreased mainly due to the influence of wear. Conversely, in the remaining case, the surface roughness increases due to the important influence of the machining parameters (or chip thickness). The variations of surface roughness for the cutting condition are consistent with the variation of the degree of surface defects for the cutting mode, as presented in the previous part of this study. Notably, the results in this study differ from those reported by [2], [32] where the authors revealed that machining with low feed speed and high cutting speed can generate a good quality machining surface.

Influence of radius cutting edge on the machining quality

Figure 7 displays the average surface roughness values for each cutting condition. The values of the standard deviation were observed to be considerably high, with the highest value of $4.23 \mu\text{m}$ given by the machining condition of spindle speed of 10000 rpm and feed speed of 500 mm/min. The reason is because of the large dispersion between the measured values at the 20 tool paths of each cutting condition. In particular, it was seen that at the feed speed of 500 mm/min (in both cases of spindle speed), the standard deviation of the surface roughness was maximum. This was another clear reflection of wear on the surface quality of CFRP composite machining surfaces. The influence of wear in terms of machining length on surface roughness was able to see in Figure 8 for a spindle speed of 8000 rpm. The largest increase in roughness with the machining length was observed for a feed speed of 500 mm/min, increasing from $3.33 \mu\text{m}$ to $15.33 \mu\text{m}$ corresponding to 203.1%. Surface roughness increased with increasing in cutting distance by 62.2% and 61.7% for feed speeds of 1000 mm/min and 1500 mm/min, respectively. This increase in surface roughness is due to an increase in the radius of the cutting edge, making the cutting process more difficult as presented in Figure 5 [31]. The cutting-edge radii could be measured by Keyence VHX-6000 Digital Microscope as shown in Figure 9. The increase of cutting-edge radii at two cutting distances of 15 cm and 300 cm with a feed speed of 500 mm/min and spindle speed of 8000 rpm were shown in Figure 10. The results showed that at a cutting distance of 15 cm, the radius of the cutting edge is $9 \mu\text{m}$, while at a cutting distance of 300 cm, the one was $22 \mu\text{m}$. The dependence of surface roughness on machining length was similarly observed in the case of 10000 rpm spindle speed as shown in Figure 11. The highest augmentation of surface roughness with increasing cutting distance was observed at a feed speed of 500 mm/min. For example, surface roughness increases by 360.3% when cutting distance reaches 3.0 m at a feed speed of 500 mm/min, while the relative increases at a feed speed of 1000 mm/min and 1500 mm/min are 54.7% and 52.5%, respectively.

The machining case with a feed speed of 500 mm/min exhibits the highest increase (360.3%) in surface roughness compared to other cutting conditions. Nguyen-Dinh et al. [33] explained that when machining with a

high spindle speed, if a spiral is developed, the contact surface between the tool and the workpiece is larger than at lower spindle speed. When combined with numerous contacts per unit time at low feed speeds, this results in increased friction and heat, leading to faster tool wear [11]. The wear rate of the cutting tool directly affects the quality of the machined surface, results in many types of defects, leading to the higher value of surface roughness. The cutting edge radius given by Keyence for this machining condition was 28 μm .

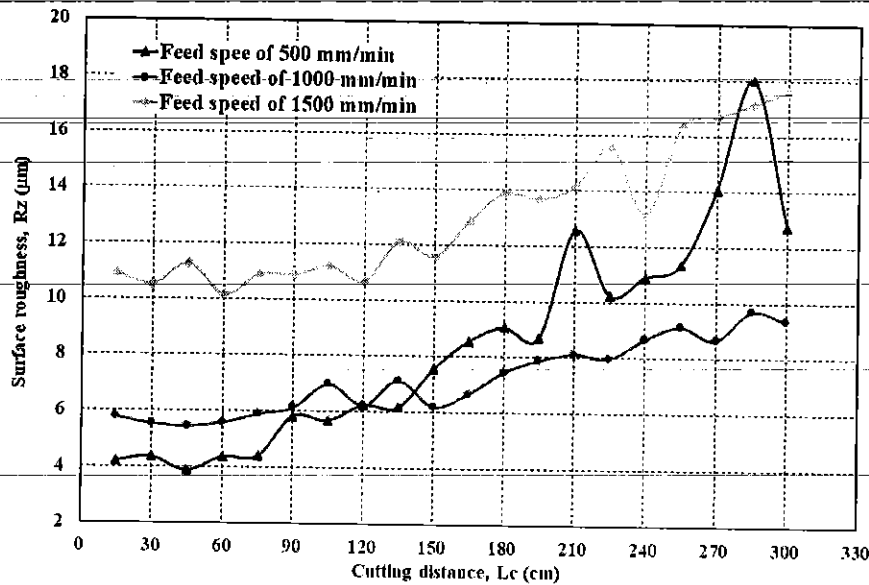


Figure 8: Evolution of R_z vs machining length for spindle speed of 8000 rpm

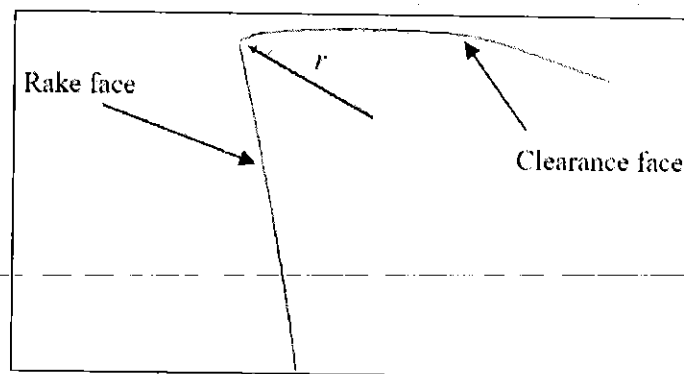


Figure 9: Profile of cutting edge radius measured from the software available in Keyence VHX-6000 digital microscope

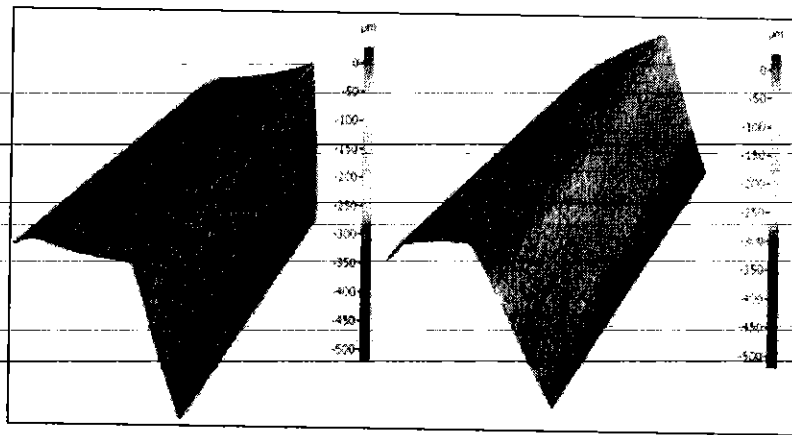


Figure 10: Cutting edge form after machining at the length of; (a) 15 cm, and (b) 300 cm with feed speed of 500 mm/min and spindle speed of 8000 rpm

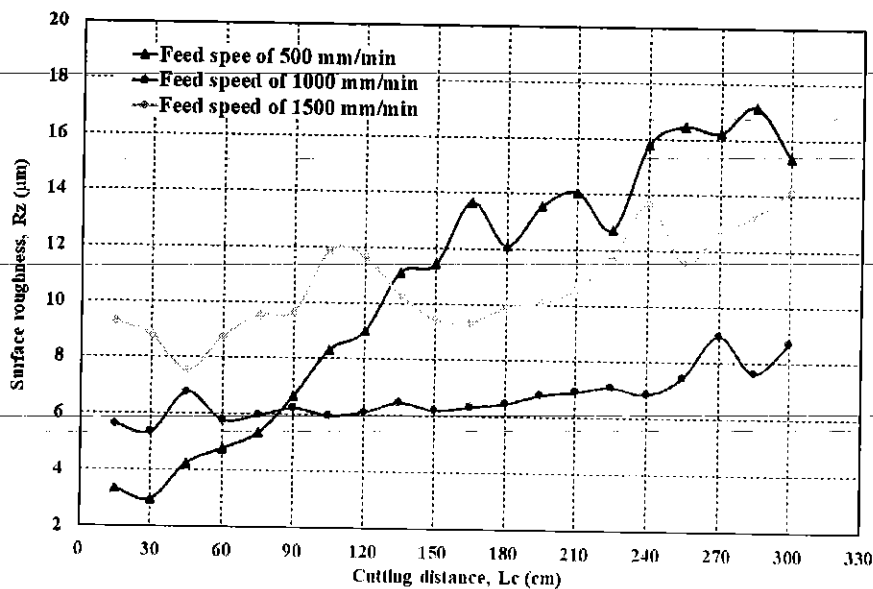


Figure 11: Evolution of R_z vs machining length for spindle speed of 10000 rpm

Conclusion

Experimental method was applied in this study to investigate the influence of machining parameters and tool wear on the quality of the machined surface when dry milling of CFRP composite plates. The quality of the machined surface was evaluated quantitatively using the surface roughness criterion. The conclusions about the research results of this study are summarized by the main results as follows:

- i. The results of qualitative assessment of the surface quality of CFRP

composite panels were shown through SEM observations. Machining defects are found to be dependent on cutting conditions when cutting length is small. However, when the cutting length increases, wear significantly influenced the formation of machining defects (observed through SEM), especially when machining with a small feed speed.

- ii. The surface roughness measurement results accurately reflected the machining quality when correctly describing the evolutions in the occurrence of machining defects observed by SEM. That is, when the machining length increased, the machining with a small feed speed, due to the large contact between the cutting tool and the workpiece, increases the friction and cutting heat, leading to the rapid wear of the cutting edge.
- iii. The machining length, characterized by the increase of the cutting-edge radius, had a great influence on the quality of the machined surface. Machining with a large feed speed, due to the small contact length, resulted in slower increase in the wear rate of the cutting edge, leading to little change in the quality of the machined surface in terms of evaluation. Meanwhile, machining with a small feed speed increases the contact length between the cutting edge and the workpiece, causing friction and heat to increase, leading to a rapid increase in the tip radius. As a result, the surface roughness increases rapidly by 203.1% and 360.3%, respectively when machining at the spindle rotation speed of 8000 rpm and 10000 rpm.

Contributions of Authors

All authors discussed the original idea. N.T.H carried out the experimental tests and analyzed the results, wrote the original manuscript with support from N.D.N. All authors provided critical feedback and helped shape the research, analysis, and manuscript. Finally, N.D.N supervised this work and revised the article. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

This work received no specific grant from any funding agency.

Conflict of Interests

The author declares that they have no conflicts of interest.

Acknowledgment

The authors wish to thank Thai Nguyen University of Technology for funding this work.

References

- [1] R.S. Niranjana, O. Singh and J. Ramkumar, "Numerical study on thermal analysis of square micro pin fins under forced convection", *Heat and Mass Transfer*, vol. 58, pp. 263–281, 2022.
- [2] P. Ghidossi, M. El Mansori, and F. Pierron, "Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, pp. 989-999, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.01.015>
- [3] J. Sheikh-Ahmad, N. Urban, and H. Cheraghi, "Machining Damage in Edge Trimming of CFRP", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, pp. 802-808, 2012. <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.648253>
- [4] Duboust, N.H Ghadbeigi, C. Pinna, S. Ayvar-Soberanis, A. Collis, R. Scaife, and K. Kerrigan, "An optical method for measuring surface roughness of machined carbon fibre-reinforced plastic composites", *Journal of Composite Materials*, vol. 51, pp. 289-302, 2016. <https://doi.org/10.1177/0021998316644849>
- [5] M. Slamani, H. Chafai, and J.F. Chatelain, "Effect of milling parameters on the surface quality of a flax fibre-reinforced polymer composite", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, pp. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.1177/09544089221126087>
- [6] M. Haddad, R. Zitoune, H. Bougherara, F. Eyma, B. Castanié, "Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior", *Composites Part B: Engineering*, vol. 57, pp.136-143, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.051>
- [7] A. Hejjaji, R. Zitoune, L. Crouzeix, S.L. Roux, F. Collombet, "Surface and machining induced damage characterization of abrasive water jet milled carbon/epoxy composite specimens and their impact on tensile behavior", *Wear*, vol. 376-377, pp. 1356-1364, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.024>
- [8] W. Hintze, D. Hartmann, and C. Schütte, "Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study", *Composites Science and Technology*, vol. 71, pp. 1719-1726, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.08.002>

- [9] M. Slamani, J.-F. Chatelain, and H. Hamedanianpour, "Influence of machining parameters on surface quality during high speed edge trimming of carbon fibre reinforced polymers", *International Journal of Material Forming*, vol. 12, pp. 331-353, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1419-2>
- [10] D. N. Nguyen, P. T. M Duong, V. S. Nguyen, V. D. Luong, T. T. N. Nguyen, T. D. Hoang, D. H. Nguyen, "The Characterization of Machined Damage of CFRP Composite: Comparison of 2D and 3D Surface Roughness Performance", *In Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 178, pp. 771-779, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64719-3_84
- [11] D.N. Nguyen, C. Bouvet, and R. Zitoune, "Influence of machining damage generated during trimming of CFRP composite on the compressive strength", *Journal of Composite Materials*, vol. 54, pp. 1413-1430, 2019. <https://doi.org/10.1177/00219983198833>
- [12] M. Haddad, R. Redouane, F. Eyma, B. Castanie, "Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 66, pp. 142-154, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.07.005>
- [13] R. Prakash, V. Krishnaraj, R. Zitoune, J. Sheikh-Ahmad, "High-Speed Edge Trimming of CFRP and Online Monitoring of Performance of Router Tools Using Acoustic Emission", *Materials*, vol 9, no. 10, 2016. <https://doi.org/10.3390/ma9100798>
- [14] J. Fulemova, and Z. Janda, "Influence of the Cutting Edge Radius and the Cutting Edge Preparation on Tool Life and Cutting Forces at Inserts with Wiper Geometry", *Procedia Engineering*, vol. 69, pp. 565-573, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.027>
- [15] K. El-Ghaoui, J.-F. Chatelain, and C. Ouellet-Plamondon, "Effect of Graphene on Machinability of Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 78, pp. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030078>
- [16] W. König, Ch. Wulf, P. Graß, H. Willerscheid, "Machining of Fibre Reinforced Plastics", *CIRP Annals*, vol. 34, pp. 537-548, 1985. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60186-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60186-3)
- [17] M. Ucar, Y.W, "End-milling machinability of a carbon fibre reinforced laminated composite", *Journal of Advanced Materials*, vol. 37, pp. 46-52, 2005.
- [18] N. Nguyen-Dinh, R. Zitoune, C. Bouvet, S. Leroux, "Surface integrity while trimming of composite structures: X-ray tomography analysis", *Composite Structures*, vol. 210, pp. 735-746, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.006>
- [19] M. Haddad, R Zitoune, F.Eyma, B. Castanié, "Machinability and

- surface quality during high speed trimming of multi directional CFRP”, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 13, pp. 289-310, 2013. [https://doi: 10.1504/ijmmm.2013.053229](https://doi.org/10.1504/ijmmm.2013.053229)
- [20] G. Caprino, I.D. Lorio, L. Nele and L. Santo, “Effect of tool wear on cutting forces in the orthogonal cutting of unidirectional glass fibre-reinforced plastics”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, pp. 409-415, 1996. [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(95\)00034-Y](https://doi.org/10.1016/1359-835X(95)00034-Y)
- [21] M.K. Nor Khairusshima, C.H. Che Hassan, A.G. Jaharah, A.K.M. Amin, A.N. Md Idriss, “Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic”, *Wear*, vol. 302, pp. 1113-1123, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.043>
- [22] D. Ozkan, M. S. Gok, H. Gokkaya, A. C. Karaoglanli, “The Effects of Cutting Parameters on Tool Wear During the Milling of CFRP Composites”, *Materials Science*, vol. 25, no. 1, pp. 42-46, 2019. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ms.25.1.19177>
- [23] F.-j. Wang, Jw. Yin, J.-w. Ma, Z.-y. Jia, F. Yang, B. Niu, “Effects of cutting edge radius and fibre cutting angle on the cutting-induced surface damage in machining of unidirectional CFRP composite laminates”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, pp. 3107-3120, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0023-9>
- [24] A. Hosokawa, N. Hirose, T. Ueda, T. Furumoto, “High-quality machining of CFRP with high helix end mill”, *CIRP Annals*, vol. 63, pp. 89-92, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.084>
- [25] A. M. Mustafa, N.S. Shahrudin1, N.F.H. Halim1, A.N. Rozhan, M. A. Hattiar, “The Effect of Cutting Speeds on Tool Wear and Surface Roughness when Milling Carbon Fibre Reinforced Polymer”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1244, pp. 1-6, 2022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1244/1/012018>
- [26] T. Elgnemi, V. Songmene, J. Kouam, M.B.G. Jun, A. M. Samuel, “Experimental Investigation on Dry Routing of CFRP Composite: Temperature, Forces, Tool Wear, and Fine Dust Emission”, *Materials (Basel)*, vol. 14. No. 19, p. 5697, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14195697>
- [27] K. Palanikumar, J.P. Davim, “Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented carbide tools”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, pp. 511-519, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.020>
- [28] N.F.H. Abd Halim, H. Ascroft, S. Barnes, “Analysis of Tool Wear, Cutting Force, Surface Roughness and Machining Temperature During Finishing Operation of Ultrasonic Assisted Milling (UAM) of Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP)”, *Procedia Engineering*, vol. 184, pp.

- 185-191, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.084>
- [29] D.H. Wang, M. Ramulu, D. Arola, "Orthogonal cutting mechanism of graphite-epoxy composite. Part II Multil-directional laminate", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 35, pp. 1639-1648, 1995. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00015-P](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00015-P)
- [30] D.H. Wang, M. Ramulu, D. Arola, "Orthogonal cutting mechanism of graphite-epoxy composite. Part I: unidirectional laminate", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 35, pp. 1623-1638, 1995. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00014-O](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00014-O)
- [31] Sheikh-Ahmad, J.Y, Machining of polymer composites. Springer New York, NY, Ed. 1, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68619-6>
- [32] X.M. Wang, L.C. Zhang, "An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43 no. 10, pp. 1015-1022, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00090-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00090-7)
- [33] P. Janardhan, J. Sheikh-Ahmad, H. Cheraghi, "Edge Trimming of CFRP with Diamond Interlocking Tools", *SAE Technical Paper 2006-01-3173*, 2006, <https://doi.org/10.4271/2006-01-3173>.
- [34] N. Nguyen-Dinh, A. Hejjaji, R. Zitoune, C. Bouvet, M. Salem, "New tool for reduction of harmful particulate dispersion and to improve machining quality when trimming carbon/epoxy composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 131, pp. 1-15, 2020. 131. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105806>
- [35] D. N. Nguyen, V.T. Pham, T.H. Nguyen, "Effects of Machining Configurations and Process Parameters on the Machining Damage Generated During Milling CFRP Structures", In: Nguyen, D.C., Vu, N.P., Long, B.T., Puta, H., Sattler, K.U. (eds) *Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 366, pp. 400-406, 2022 https://doi.org/10.1007/978-3-030-92574-1_41